

**Západočeská univerzita v Plzni**  
**Fakulta elektrotechnická**

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

**Aerosol Jet – alternativní technologie kontaktování,  
propojování a realizace součástek na flexibilních a 3D  
substrátech**

**Ing. Jiří Navrátil**

**Plzeň, 2021**



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY  
V PLZNI

# **Disertační práce**

**k získání akademického titulu doktor v oboru  
Elektronika**

**Ing. Jiří Navrátil**

**Aerosol Jet – alternativní technologie kontaktování,  
propojování a realizace součástek na flexibilních a 3D  
substrátech**

**Školitel: doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.**

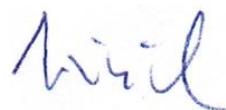
## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem prameny, které cituji a uvádím v seznamu literatury. V předložené vědecké práci jsou použity obvyklé vědecké postupy.

V Plzni, datum

10.8. 2021

.....



podpis

## Poděkování

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Alešovi Hamáčkovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady při jejím zpracování a za přátelský přístup a psychickou odolnost při mentorování mé osoby po celou dobu mého doktorského studia. Rovněž bych rád poděkoval kolegům z Katedry materiálů a technologií, kteří mi pomáhali a poskytovali cenné rady v průběhu mého studia.

Rád bych také poděkoval své rodině, která mě při studiu finančně i morálně podporovala.

Poděkování patří také bikeparku Špičák, který byl významným prvkem mé duševní hygieny.

## Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá tištěnou elektronikou, zejména pak využitím unikátní tiskové technologie Aerosol Jet v této oblasti. V teoretické části práce je shrnut současný stav poznání a jsou popsány jedny z nejběžněji využívaných selektivních tiskových technologií. Experimentální část práce je zaměřena na aplikaci tiskových technologií (obzvláště technologie Aerosol Jet) v oblasti tištěných rezistorů a kontaktování součástek pro keramické substráty technologie TPC (thick printed copper) a nízkoteplotní substráty a na aplikaci v oblasti sensorových elementů, kde jsou realizovány plně tištěné senzory teploty na vlákněných strukturách a elektrochemické senzory oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ) a etylenu ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ).

## Klíčová slova

tištěná elektronika, Aerosol Jet, tištěný rezistor, senzor, vlákno, elektrochemický senzor, oxid dusičitý, etylen,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$

## Abstract

The thesis is focused on printed electronics, especially on utilizing unique Aerosol Jet printing technology in this field. It also describes state of art of printed electronics and a few of the most commonly used selective printing technologies today. The experimental part is focused on utilizing printing technologies (primarily Aerosol Jet) in the field of printed resistors for TPC technology and SMD components interconnecting for ceramics substrates of TPC (thick printed copper) technology and also for low temperature substrates. The experimental part is also focused on fully printed sensors. The temperature sensors on thread like structures and electrochemical sensors of nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) and ethylene ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) were realized.

## Keywords

Printed electronics, Aerosol Jet, printed resistor, sensor, fiber, thread, electrochemical sensor, nitrogen dioxide, ethylene,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$

## Obsah

|   |    |
|---|----|
| Seznam použitých zkratk a symbolů .....   | 6  |
| Úvod .....  | 8  |
| 1 Současný stav poznání.....  | 10 |
| 1.1 Depoziční technologie .....   | 11 |
| 1.1.1 Dávkování.....  | 12 |
| 1.1.2 Sítotisk/šablonový tisk.....  | 13 |
| 1.1.3 Inkoustový tisk (Inkjet) .....  | 15 |
| 1.1.4 Tisk Aerosolu (Aerosol Jet).....  | 18 |
| 1.2 Perspektivní oblasti využití depozičních technologií .....                              | 29 |
| 1.2.1 Propojovací a funkční struktury .....   | 29 |
| 1.2.2 Kontaktování součástek .....  | 32 |
| 1.3 Plasmatická úprava povrchů .....  | 32 |
| 1.3.1 Kompatibilita substrátu a inkoustu .....  | 34 |
| 2 Cíle disertační práce .....   | 36 |
| 3 Technologie vytváření a kontaktování elektronických součástek<br>tiskovými metodami ..... | 37 |
| 3.1 TPC technologie .....   | 37 |
| 3.1.1 Návrh a realizace tištěných součástek pro TPC technologii.....                        | 38 |
| 3.1.2 Kontaktování součástek pro TPC technologii .....                                      | 46 |
| 3.2 Návrh a realizace kontaktování součástek pro nízkoteplotní substráty .....              | 48 |
| 3.2.1 Testovací motiv a součástky.....  | 48 |
| 3.2.2 Tiskové materiály .....   | 50 |
| 3.2.3 Příprava vzorků .....   | 50 |
| 3.2.4 Vyhodnocení.....  | 51 |
| 4 Plně tištěné sensorové elementy.....  | 56 |
| 4.1 Sensorový element použitelný na vlákenných strukturách.....                             | 57 |
| 4.1.1 Topologie sensorů .....   | 58 |
| 4.1.2 Příprava vzorků .....   | 58 |
| 4.1.3 Měření.....   | 61 |
| 4.1.4 Vyhodnocení.....  | 63 |
| 4.2 Elektroodové systémy pro sensorické aplikace .....                                      | 64 |
| 4.2.1 Sensor oxidu dusičitého (NO <sub>2</sub> ).....                                       | 64 |
| 4.2.2 Sensor etylenu (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) .....                                 | 72 |
| Závěr.....  | 82 |
| Shrnutí .....   | 86 |
| Summary.....  | 87 |
| Resumen .....   | 88 |
| Seznam použité literatury a informačních zdrojů.....  | 89 |
| Seznam publikací a výstupů studenta vztahující se k předmětu disertační práce .....         | 94 |
| Ostatní publikace a výstupy studenta .....  | 96 |

## Seznam použitých zkratek a symbolů

| Zkratka    | Popis  | Význam  |
|------------|--|---|
| AJP        | aerosol jet printing                             | tisková technologie                               |
| CAD        | computer aided design                            | podpora designu pomocí počítačových programů      |
| CE         | counter electrode                                | pomocná elektroda                                 |
| CIJ        | continuous Inkjet                                | typ technologie Inkjet                            |
| CNT        | carbon nanotubes                                 | uhlíkové nanotrubičky                             |
| CPV        | concentrated photovoltaic                        | koncentrovaná fotovoltaika                        |
| DBC        | direct bond copper                               | tlustovrstvá technologie                          |
| DOD        | drop on demand                                   | typ technologie Inkjet                            |
| HIV        | human immunodeficiency virus                     | virus lidské imunitní nedostatečnosti             |
| IoT        | internet of things                               | internet věcí                                     |
| IRP        | intermittent resistor pattern                    | motiv pro stanovení kontaktního odporu            |
| MLF        | micro lead frame package                         | typ SMD pouzdra                                   |
| MLP        | micro lead frame package                         | typ SMD pouzdra                                   |
| MW CNT     | multiwall CNT                                    | vícestěnné CNT                                    |
| PA         | pneumatický atomizér                             | součástka Aerosol Jet                             |
| PEDOT      | Poly(3,4-ethyldioxythiofen)                      | polymer   |
| PEN        | polyethylen naftalát                             | dielektrická látka                                |
| PET        | polyethylen                                      | dielektrická látka                                |
| PETA       | poly(p-etylen tereftalamid)                      | dielektrická látka                                |
| PI         | polyimid   | dielektrická látka                                |
| PSS        | polystyren sulfonát                              | polymer   |
| PVP        | poly(4-vinylfenol)                               | dielektrická látka                                |
| QFN        | quad flat no-leads package                       | typ SMD pouzdra                                   |
| RE         | reference electrode                              | referenční elektroda                              |
| S          | stavítko   | součástka Aerosol Jet                             |
| SARS-CoV-2 | severe acute respiratory syndrome corona virus 2 | virus způsobující onemocnění covid-19             |
| SMD        | surface mount device                             | součástka technologie SMT                         |
| SMT        | surface mount technology                         | technologie povrchové montáže součástek           |
| SPE        | solid polymer electrolyte                        | pevnolátkový polymerní elektrolyt                 |
| SW CNT     | singlewall CNT                                   | jednostěnné CNT                                   |
| THT        | through hole technology                          | technologie klasické montáže součástek skrz otvor |
| TPC        | thick printed copper                             | tlustovrstvá technologie                          |
| UA         | ultrazvukový atomizér                            | součástka Aerosol Jet                             |
| UV         | ultra violet                                     | ultrafialové                                      |
| VI         | virtual impactor                                 | součástka Aerosol Jet                             |
| WE         | working electrode                                | pracovní elektroda                                |

| Veličiny |  |   |
|----------|--|---|
| Zkratka  | Význam   | Jednotka                                  |
| pH       | chemická veličina, udává zásadité/kyselé chování roztoků | 0-14 (0 kyselé, 7 neutrální, 14 zásadité) |
| I        | elektrický proud   | Ampér                                     |
| R        | elektrický odpor   | Ohm                                       |
| RH       | relativní vlhkost  | %   |
| T        | termodynamická teplota                                   | Kelvin                                    |

| Jednotky |                              |                              |
|----------|------------------------------|------------------------------|
| Zkratka  | Popis                        | Význam                       |
| A        | ampér                        | jednotka elektrického proudu |
| h        | hodina                       | jednotka času                |
| l nebo L | litr                         | jednotka objemu              |
| m        | metr                         | jednotka délky               |
| min      | minuta                       | jednotka času                |
| mPa·s    | milipascalsekunda            | jednotka viskozity           |
| ppb      | parts per bilion             | částic na miliardu           |
| ppm      | parts per million            | částic na milion             |
| s        | sekunda                      | jednotka času                |
| sccm     | standardní kubický centimetr | jednotka objemu              |
| Ω        | ohm                          | jednotka elektrického odporu |

| Násobné předpony |       |           |
|------------------|-------|-----------|
| Zkratka          | Popis | Význam    |
| m                | mili  | $10^{-3}$ |
| μ                | mikro | $10^{-6}$ |
| n                | nano  | $10^{-9}$ |
| k                | kilo  | $10^3$    |
| M                | mega  | $10^6$    |

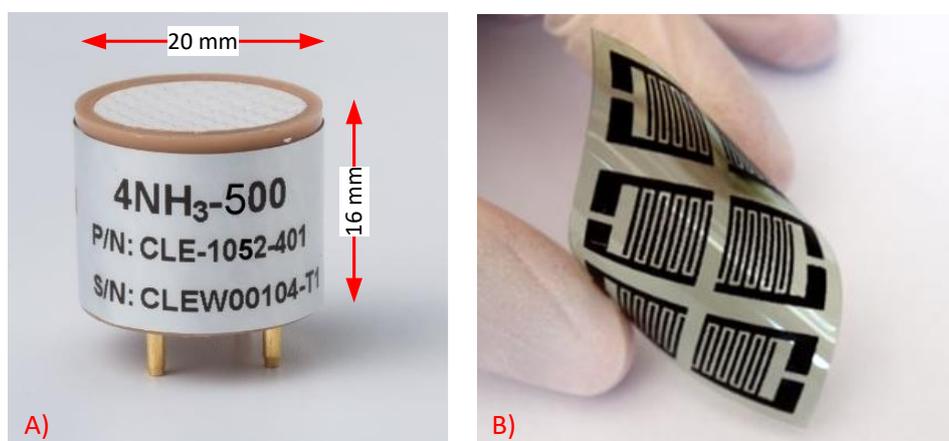
## Úvod

Technologie výroby elektroniky, její propojování a kontaktování sahají až do konce 19. století, kdy po vynálezu relé bylo možné pomocí něj vytvářet logické vazby mezi signály. Dalším milníkem byl vynález elektronky a vznik prvních elektronkových počítačů, z nichž jeden z nejznámějších je počítač ENIAC [1]. Velmi prudký vývoj zažila elektronika ve 2. pol. 20. století po vynálezu tranzistoru. Ten umožnil do té doby nevídanou miniaturizaci zařízení a vývoj prvních integrovaných obvodů. V konvenční elektronice se začaly široce uplatňovat a automatizovat výrobní procesy jako chemické či galvanické pokovení, leptání, sítotisk, šablonový tisk nebo fotoprocesy. Miniaturizaci provázela větší komplexnost obvodů a tedy i větší hustota součástek na deskách plošných spojů. To vedlo k rozvoji automatických osazovacích linek, které v dnešní době dovedou osadit až několik stovek tisíc součástek za hodinu. V propojování a kontaktování se začalo využívat pájení či bondování mikrodrátky, později i lepení součástek speciálními vodivými lepidly. Všechny z těchto zmíněných technologií byly v průběhu let značně zdokonaleny a automatizovány a dnes tvoří nedílnou součást výroby konvenční elektroniky. Nejprve byla na tehdejší dobu špičková elektronika určena spíše pro využití v armádě či jako součást výpočetních zařízení v průmyslové výrobě. Až později se začala elektronika dostávat do domácností v podobě prvních počítačů, kde začínala sloužit nejen jako prostředek pro práci, ale i jako prostředek trávení volného času.

Další větší boom nastal s rozvojem internetu jako celosvětové sítě, která zařízením umožňuje propojovat se a sdílet obsah. Elektronika s připojením k internetu s mnohonásobně větším výkonem, než měly první počítače, se začala přesouvat do kapes uživatelů a tvořit součást jejich každodenního života. S tím, jak se z elektroniky stala zařízení, která nosí uživatelé neustále při sobě, razantně začaly vzrůstat požadavky na nízkou hmotnost takových zařízení a jejich komfortní nošení a ještě větší miniaturizaci. V poslední dekádě se o tento obor nositelné elektroniky (wearables) začíná zajímat stále větší množství výrobců, kteří v něm spatřují perspektivní obor s možností dynamického ekonomického růstu. Místo výroby plošných spojů na rigidních, nejčastěji sklo-epoxidových laminátových substrátech se začalo experimentovat s využitím flexibilních folií (PET, PEN, Polyimid atd.) či textilií jako substrátů. Nelze opomenout ani rozvoj 3D tisku. Pomocí něj lze vytvářet i velmi složité 3D objekty z rozličných materiálů (polymery, kompozity, kovy). Byly vyvinuty pokročilé tiskové technologie s víceosým polohováním, které umožňují tisk elektroniky na tyto 3D objekty. Tím, že lze využít celou

plochu 3D objektu dochází opět k další miniaturizaci a možnosti větší integrace. Rozvoj v materiálovém výzkumu přinesl širokou škálu materiálů (často i nanostrukturních) s různými vlastnostmi (vodiče, polovodiče, izolanty, senzorické materiály, piezoelektrika, magnetika atd.), které mohou být zpracovány tiskovými technologiemi. Tiskové technologie se přirozeně vyvíjely s pokrokem v elektronice a materiálech, jednou z posledních nejmodernějších technologií je Aerosol Jet, která vznikla v 90. letech 20. století. Tato technologie umožňuje tisk propojovacích a funkčních struktur s vysokou hustotou integrace i na flexibilních či 3D substrátech. Dovede při tom využívat obrovské množství pokročilých tiskových, často nanostrukturních, materiálů. Trendem ve vývoji je také využívání organických a biodegradabilních materiálů pro tisk elektroniky (např. pro tištěné organicko-elektrochemické tranzistory či senzory (Obr. 1)). [2] Vznikl tak celý nový perspektivní obor, který se nazývá tištěná elektronika a který využívá řadu pokročilých tiskových technologií a velmi široký rozsah materiálů a substrátů. Řadu technologií pro tištěnou elektroniku využívá i další z nových oborů – smart textilie. Ten se zabývá vytvářením funkčních elektronických struktur a jejich propojováním na textilních substrátech. Významnou součástí tištěné elektroniky a smart textilií je také kontaktování. Jelikož oba výše zmíněné moderní směry využívají často nízkoteplotní, ohebné či pružné substráty (např. fólie na bázi PET či textil), klasické technologie kontaktování (např. pájení) jsou kvůli vysoké teplotě a křehkosti spoje často nepoužitelné. Je tedy nutné se na celou problematiku tištěné elektroniky dívat nejen z pohledu samotné výroby tištěného prvku, ale i možností jeho následného připojení k řídicím nebo vyhodnocovacím obvodům.

[2]



Obr. 1 Senzor čpavku ve dvou různých provedeních: A) konvenční elektronika - THT součástka [3]  
B) tištěná elektronika – šestice senzorů na flexibilní PET folii

## 1 Současný stav poznání

Tištěná elektronika je termín, který zahrnuje depozici funkčních materiálů na substráty a tvorbu funkčních elektronických celků či jejich částí. Tištěná elektronika nám umožňuje vyrobit elektroniku ultra tenkou, flexibilní s větší sensorovou plochou a s více funkcemi. Prvním základním prvkem tištěné elektroniky jsou funkční materiály – pasty, inkousty. Pomocí těchto materiálů je možné vytvářet vodivé, polovodivé, dielektrické, sensorické či jiné speciální funkční vrstvy. Druhým prvkem jsou substráty. Takovéto funkční materiály lze samozřejmě tisknout na konvenční substráty jako je keramika, FR substráty či sklo. Lze ale velmi snadno využívat i řadu dalších substrátů jako jsou flexibilní fólie, biodegradabilní materiály, tvarované či 3D substráty. Třetím prvkem pro tištěnou elektroniku jsou zřejmě tiskové technologie, které umožňují její výrobu. Lze říci, že současná doba přeje hybridním technologiím – využití několika tiskových metod pro tvorbu funkčního tištěného bloku, případně kombinace moderních tiskových technologií s konvenčními SMT součástkami [4]. Tímto způsobem lze synergií využít z každé depoziční technologie její nejlepší vlastnosti. Jednou z nejmodernějších depozičních technologií je technologie Aerosol Jet, ani ta ovšem nevznikla s cílem nahradit technologie současné, ale pouze je doplnit a umožnit další, větší integraci elektroniky a rozšířit její možnosti.

V dnešní době je rychle rostoucím segmentem trhu chytrá nositelná elektronika, tzv. wearables. Stejný, ne-li větší důraz je zde kladen na komfort nošení, lehkost, malou velikost než na spolehlivost či vysokou odolnost zařízení. Přesně tyto parametry může danému segmentu tištěná elektronika nabídnout. Dalším rostoucím segmentem trhu, který je z hlediska využívání tištěné elektroniky velmi slibný je IoT tzv. internet věcí. Dle některých odhadů může být celosvětově v roce 2025 připojeno do IoT sítí zhruba 75 miliard zařízení. [5] Nízká cena a možnost rychlé hromadné výroby jsou zajímavé např. pro plně tištěná pole senzorů, která mohou být v rámci IoT sítí nasazena. Nepřehlédnutelnou výhodou tištěné elektroniky je také podstatně efektivnější zacházení s materiály a menší zátěž pro životní prostředí, než u výroby konvenční elektroniky pomocí kombinace leptacích a pokovovacích procesů.

## 1.1 Depoziční technologie

Depoziční technologie jsou podmnožinou aditivních technologií, tj. těch, které nanáší další materiál na substrát. Tyto technologie lze rozdělit na technologie plošné depozice a selektivní depozice. [6]

### Plošná depozice

Technologie plošné depozice (např. clonové lití, ponor, spin coating, spray coating) vytvoří vrstvu kapalného materiálu zpravidla na celém substrátu. Tyto technologie nemají pro výrobu tištěné a flexibilní elektroniky tak velký význam jako technologie selektivní a jsou spíše výsadou klasické výroby elektroniky. Mezi plošné depoziční technologie lze zařadit i vakuové napařování a napařování, ty ovšem z principu deponují materiál v suché formě (tj. ne ve formě pasty či inkoustu), a proto nejsou dále podrobněji popisovány.

### Selektivní depozice

Oproti tomu technologie selektivní depozice vytvoří vrstvu kapalného materiálu na substrátu pouze v místech, kde je to žádoucí. Snadno lze také měnit množství materiálu na různých místech substrátu. Selektivní depozice je také ekologicky i ekonomicky úspornější technologií – nedochází v takové míře k plýtvání materiálem jako u plošné depozice a proces výroby funkčního obvodu je podstatně rychlejší. V průběhu let byla vyvinuta velká řada selektivních depozičních technologií a jejich různých odnoží, úprav a specialit. V práci jsou dále popsány základní a dnes využívané technologie selektivní depozice, které mají potenciál pro využití v tištěné elektronice.

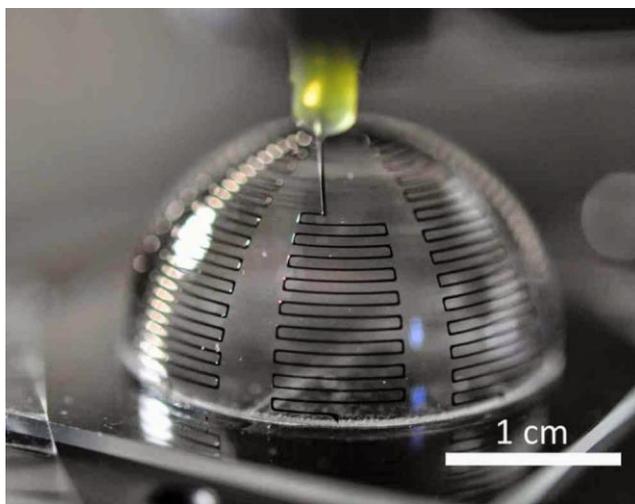
### 1.1.1 Dávkování

Dávkování, také známé jako dispenzing, je depoziční metoda selektivního nanášení pastovitého materiálu. V elektrotechnice je využívána např. pro nanášení pájecí pasty na pájecí plošky u malosériové či prototypové výroby. Existují dva základní typy dispenzingu [6], a to:

- Plnými jehlami,  
Plná jehla (hrot) je namočena v tekutém materiálu a hrot se následně dotkne místa na substrátu - tekutý materiál steče z hrotu na místo určení.
- Dutými jehlami.  
Tekutý materiál je protlačován skrz dutou jehlu pomocí vzduchového či šroubového pístu.

Dnes jsou na trhu dostupné dispenzery s dutými jehlami s víceosým polohovacím systémem, které dovedou kopírovat nerovnosti povrchu a deponovat tak materiál i na složité 3D povrchy (Obr. 2) a vytvářet tak součásti pokročilé tištěné elektroniky. Tyto stroje v sobě spojují jednoduchost protlačování pasty dutou jehlou s komplexním řízením pohybu hlavy. [7][8]

Dalšími typy technologie dispenzing je bezkontaktní dispenzing či jetting, kam patří i technologie Inkjet a Aerosol Jet. Tyto technologie jsou od klasické technologie dispenzing plnou a dutou jehlou natolik odlišné, že jsou popsány dále v samostatných kapitolách.



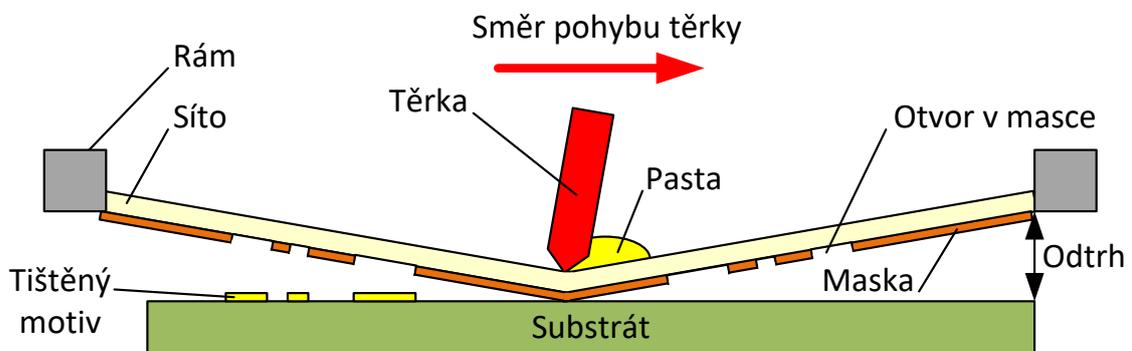
Obr. 2 Motiv tištěný pomocí víceosého dispenzeru na 3D substrát [8]

## 1.1.2 Sítotisk/šablonový tisk

Sítotisk patří k nejstarším tiskovým technologiím a jeho vznik bývá přisuzován vyspělým kulturám Dálného Východu okolo roku 1000 př. n. l.. Velkým rozvojem si sítotisk prošel na začátku 20. století v USA, kde začal být masivně využíván pro reklamní účely (tisky plakátů, letáků). Další velké rozšíření nastalo po 2. světové válce, při které došlo k významnému pokroku v chemii, a existovala tedy řada funkčních materiálů, které mohly být tisknuty. Zároveň byl učiněn dramatický pokrok v elektronice a v její výrobě se i díky pokroku v chemii stal sítotisk dodnes nenahraditelnou technologií. Sítotiskové technologie by dnes bylo možné rozdělit na dvě odvětví – sítotiskové technologie pro grafické účely (které jsou na ústupu hlavně kvůli ofsetovému tisku a flexografickému tisku) a sítotiskové technologie pro realizaci funkčních vrstev a motivů, který má velký význam právě u výroby klasické konvenční elektroniky i u elektroniky tištěné. [9]

### Princip technologie

Principem sítotisku je protlačování pastovitého materiálu pomocí třerky skrz síto a masku na něm vytvořenou (Obr. 3). Šablonový tisk využívá stejných zařízení, jen je místo síta použita kovová či plastová fólie s otvory (šablona). [10]



Obr. 3 Princip sítotisku

### Síto

Samotné síto může být vyrobené ze syntetických (nejčastěji polyesterových), pokovených či plně kovových vláken (např. nerezových). Pro grafické či umělecké využití se lze setkat ještě s vlákny čistě přírodními (např. hedvábnými). Hustota síta je daná počtem otvorů na jednotku plochy ( $\text{cm}^2$ , případně  $\text{palec}^2$ ) Velmi důležitým parametrem síta je jeho napnutí v rámu. Napnutí síta musí být rovnoměrné v celém rámu a co nejstálější v čase. Pro

napínání sít byla vytvořena počítačově řízená pneumatická, mechanická a hydraulická napínací zařízení. [11]

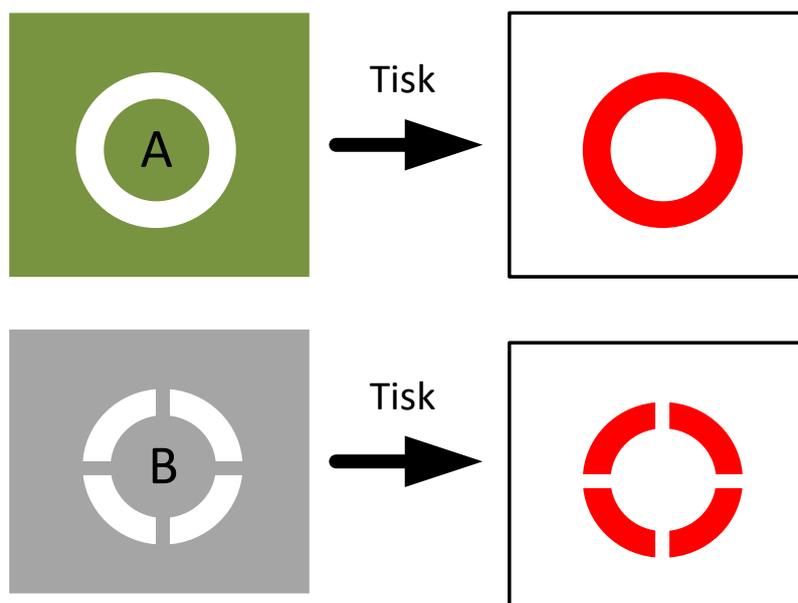
Síto je také nosič tisknutého motivu. Motiv je na sítu vytvořen zamaskováním otvorů síta tak, že jediné průchozí otvory jsou pro tisknutý motiv jako je vidět na Obr. 4. Masku tvoří nejčastěji fotocitlivá emulze s otvory vytvořenými pomocí fotoprocesu. S tím se pojí klasické fotolitografické procesy jako je expozice a vyvolání. Síto se substrátu dotýká pouze v místě přítlaku těrky, jinak je v nenulové vzdálenosti, která se nazývá odtrh (Obr. 3). Tloušťka vrstvy nanesené pasty po nivelaci je přibližně 1/3 tloušťky síta. [11] [6]



Obr. 4 Detail motivu na polyesterovém sítu

### Šablona

Šablona je nejčastěji vyrobena z kovu (mosaz, nerez) či plastu. Do šablony jsou vytvořeny otvory pomocí různých technologií (leptání, frézování, laser) a skrze tyto otvory je protlačena těrka při tisku pasta. Oproti sítotisku se šablona celým svým povrchem dotýká substrátu (odtrh je tedy roven nule) a tloušťka natištěné vrstvy je rovna tloušťce šablony. Výhodou šablony je vyšší přesnost, jasně definovaná tloušťka vrstvy, jednodušší údržba a často i vyšší životnost. Nevýhodou je nemožnost vytvářet některé typy motivů. Oproti sítu zde veškeré vytvořené motivy musí být propojeny s hlavním tělem šablony pomocnými můstky (např. při tisku kružnice). Na Obr. 5 je znázorněna sítotisková maska (zeleně) s otvory (bíle), materiál šablony (šedivě) s otvory (bíle) a výsledný tisk (červeně).



Obr. 5 Motiv v sítotiskovém provedení (A) a v provedení pro šablonový tisk (B)

### Těrka

Těrka je nástroj, který má za úkol protlačovat tiskovou pastu přes síto či šablonu. Materiálem pro výrobu těrky mohou být kovy, polyuretan, neopren, silikon, fluorované uhlovodíky, gumy apod. Těrky jsou dodávány jako lišty různých profilů a tvrdostí, použití přesně daného typu závisí na požadované kvalitě tisku, typu a hustotě síta či použité tiskové pastě. [12][13]

### 1.1.3 Inkoustový tisk (Inkjet)

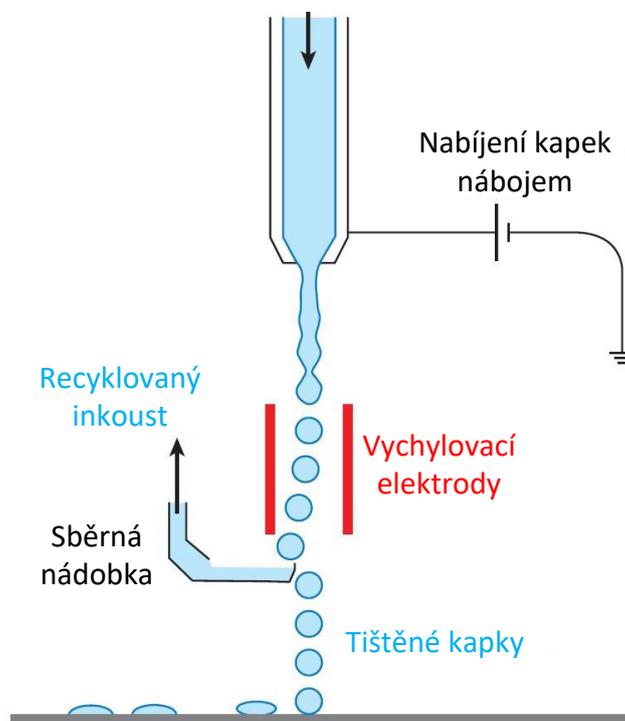
Technologie inkoustového tisku je založena na principu formování a vypuzování drobných kapiček inkoustu na substrát. Technologie je průmyslově zavedená a existuje obrovské množství komerčních materiálů vyvinutých přímo pro inkjet. Návrh motivu je vytvářen v CAD systému, což umožňuje velmi rychlou a jednoduchou případnou změnu či úpravu tiskového motivu. Co se týče zařízení, opět existují v rozpětí od laboratorních stolních velikostí (Obr. 6) až po víceosé systémy schopné tisku na 3D povrchy. Pro všechny inkjet technologie platí, že vzdálenost tryska-substrát musí být velmi malá a obvykle nepřesahuje 1 mm. Existují dvě základní inkjet technologie, a to CIJ (Continuous inkjet) a DOD (Drop on demand). [14][15][16]



Obr. 6 Inkjet Dimatix DMP-2850 [17]

### CIJ

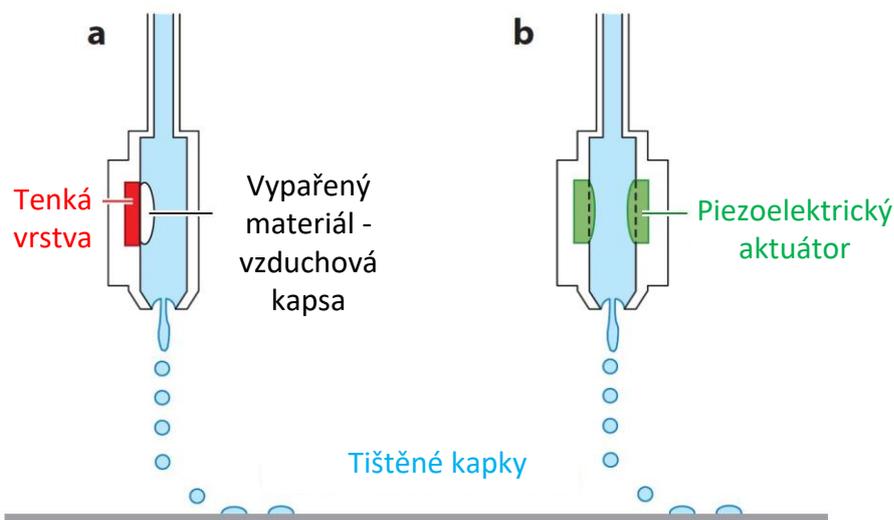
Technologie CIJ generuje nepřetržitý proud kapiček inkoustu. Pokud na daném místě není potřeba tisknout materiál, jsou kapičky neustále generovány, ale jejich směr je odchýlen elektrickým polem do sběrné nádoby a nikoliv na substrát (viz Obr. 7). Výhodou kontinuálního generování kapek inkoustu je, že nedochází příliš často k zasychání inkoustu v trysce. Nevýhodou je, že ne všechen inkoust odvedený do sběrné nádoby lze opětovně využít. Kontinuální metodou tisku lze tisknout motivy o šířce linií od přibližně 100  $\mu\text{m}$ . [14][16]



Obr. 7 Princip CIJ technologie; převzato a upraveno z [14]

## DOD

Technologie DOD oproti CIJ generuje kapičky inkoustu jen, když je to tiskovým motivem vyžadováno. Inkoust je nahromaděn v trysce a až v momentě, kdy je to vyžadováno, je kapička z trysky vypuzena na substrát. Tvorba kapek inkoustu je buď na principu termálním, nebo na principu piezoelektrickém (viz Obr. 8). Pro vytvoření kapky inkoustu je potřeba tlakový impuls. U termálního systému je zahřátý tenkovrstvý odporový element natolik, že materiál inkoustu kolem něj je vypařen a zformuje bublinu. Poté co je zastaveno ohřívání odporového elementu, bublina vlivem okolního inkoustu velmi rychle kolabuje a tento rychlý kolaps tvoří potřebný tlakový impuls pro zformování kapky a její vystřelení na substrát. U piezoelektrického systému je tlakový impuls tvořen mechanicky deformací piezoelektrických aktuátorů. Výhodou DOD technologie je efektivnější hospodaření s inkoustem než u CIJ, nejsou také zapotřebí elektrostatické vychylovací desky. Nevýhodou technologie je vyšší náchylnost k zasychání inkoustu v trysce, zvláště při tisku velmi nespojitých motivů. DOD technologie vytváří menší kapky inkoustu než CIJ a dovede tisknout motivy s vyšším rozlišením. Touto metodou tisku lze tisknout motivy o šířce linií od přibližně 20  $\mu\text{m}$ . [14][16]



Obr. 8 Princip DOD inkjet technologie - a) termální b) piezoelektrický; převzato a upraveno z [14]

### 1.1.4 Tisk Aerosolu (Aerosol Jet)

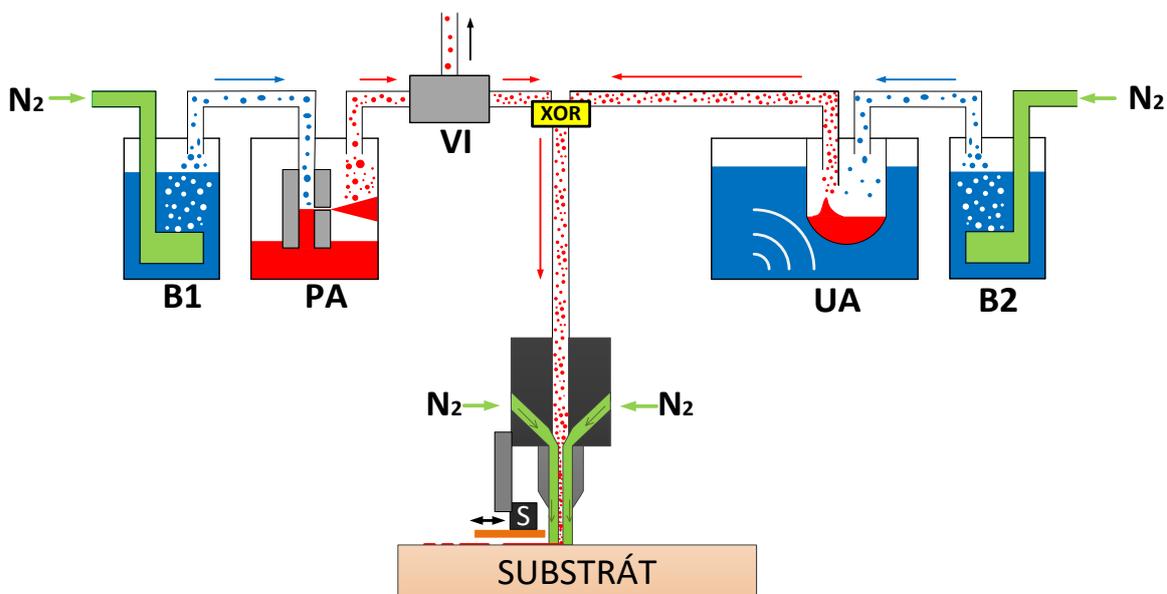
Aerosol Jet je unikátní tisková technologie, která vznikla v 90. letech 20. století v USA, kdy již byly poměrně zavedené technologie jako sítotisk, šablonový tisk či inkjet. V roce 1990 agentura DARPA (Defence Advanced Research Program Agency) inicializovala projekt MICE (Mesoscopic Integrated Conformal Electronics), jehož úkolem bylo vyvinutí nástroje pro výrobu tištěné elektroniky. Byl kladen důraz na to, aby nově vyvinutá technologie:

- byla schopna efektivně využívat CAD systémy pro návrh motivů,
- byla rychlá, flexibilní a relativně jednoduchá,
- dovedla využívat široké spektrum materiálů pro tisk,
- dovedla tisknout na široké spektrum substrátů (včetně nízkoteplotních < 200 °C).

Projekt MICE skončil úspěšně a jedním z jeho výstupů byla právě Aerosol Jet technologie. Spolu s komercializací technologie vznikla v roce 1997 firma Optomec Inc. se sídlem v Albuquerque (Nové Mexiko, USA). Firma Optomec má ve svém portfoliu dva programy – Aerosol Jet a LENS (3D tiskárna pro tisk kovů). Společnost Optomec velmi úzce spolupracuje na výzkumu a vývoji s velkým množstvím světově významných technologicky vyspělých firem, agentur či výzkumných ústavů (např. Boeing, General Electric, Xerox, NASA, armáda USA, CEA LETI, Fraunhofer...) [18]

#### **Princip Technologie**

Principem technologie je vytvoření aerosolu a jeho selektivní depozice na substrát. Jako nosný i zaostřovací plyn je používán dusík 5.0 (čistota 99,999%). Pro lepší ilustraci principu budou následně popsány důležité součásti, které tvoří základ Aerosol Jet technologie (viz Obr. 9).



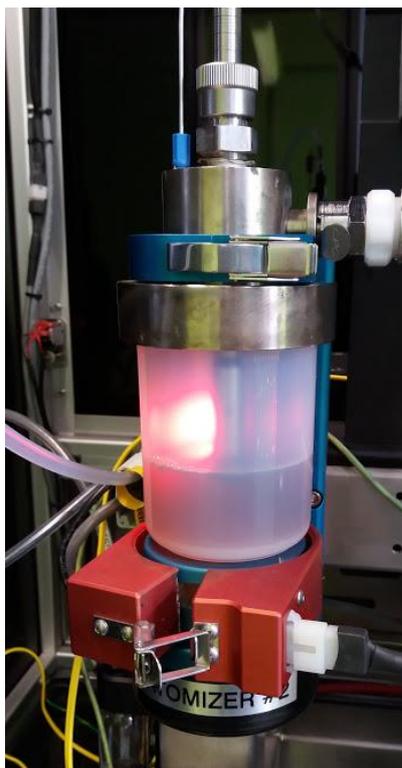
Obr. 9 Schéma systému Aerosol Jet

### Atomizér

Atomizér je součástka, jejímž úkolem je vytvářet z inkoustu aerosol. V zařízení mohou být dostupné dva typy atomizérů, a to pneumatický (PA) a ultrazvukový (UA). Standardně lze používat buď pneumatickou, nebo ultrazvukovou větev systému. Existují ale i systémy, které dovedou aerosol připravovat ve více atomizérech (a tedy i z různých materiálů) současně a před průchodem tiskovou hlavou různé materiály ve formě aerosolu v jakýchkoliv poměrech míchat a tisknout tak kompozitní inkoust.

#### Pneumatický atomizér (PA, viz Obr. 9)

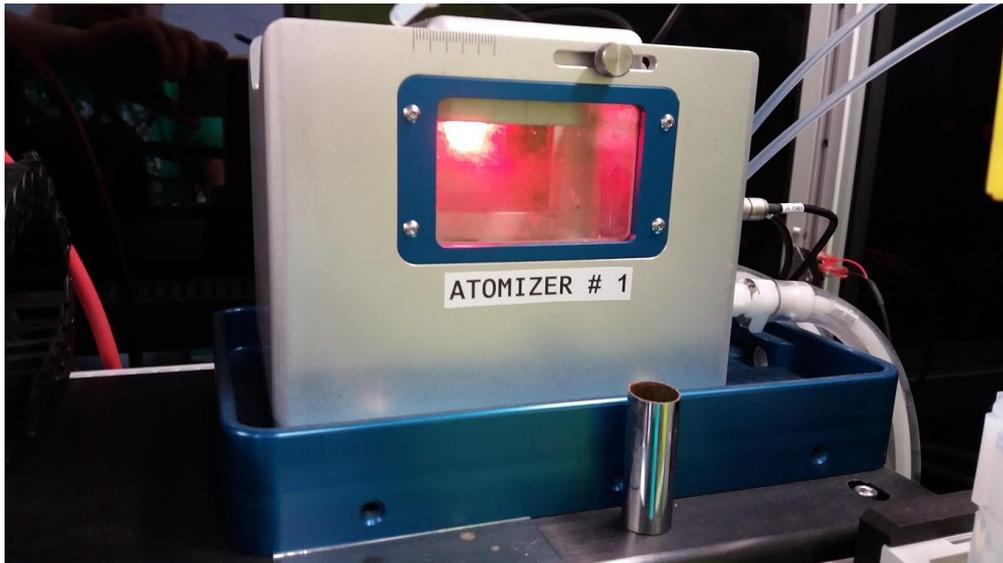
V pneumatickém atomizéru (Obr. 10) je prouděním nosného plynu na základě Venturiho efektu nasáván inkoust do atomizační trysky a rozprašován na stěnu atomizační nádoby. Kapičky inkoustu, které jsou již dostatečně malé (průměr  $<5 \mu\text{m}$ ) mohou být unášeny nosným plynem dále do systému k součástce tzv. Virtual Impactor (VI). Kapičky, které jsou větší, spadnou zpět do zásobníku inkoustu a znovu absolvují nasátí a rozprašení atomizační tryskou. Výhodou pneumatického atomizéru proti ultrazvukovému je široké spektrum viskozit materiálů (1-1000 mPa·s), nevýhodou může být potřeba alespoň 15 ml vstupního množství inkoustu. Atomizér je schopný dodávat i poměrně velké množství aerosolu, je tedy vhodný pro tisk širších linií či nanášení tlustších vrstev materiálu na substrát.[18][19]



Obr. 10 Pneumatický atomizér

#### **Ultrazvukový atomizér (UA, viz Obr. 9)**

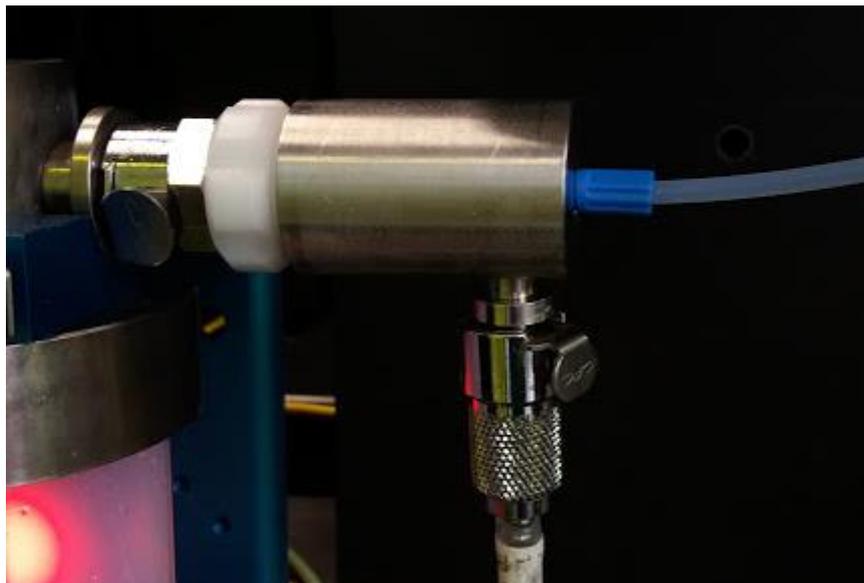
V ultrazvukovém atomizéru (Obr. 11) je tisknutý inkoust umístěn do perfluoropolymerového (PFA) vřáku, který je vložen do ultrazvukové vodní lázně. Ultrazvukové vlny z měničče přes vodní lázeň rozrušují povrch inkoustu a otrhávají z něj drobné kapky. Opět zde platí totéž, co u pneumatického atomizéru – kapky které jsou  $<5 \mu\text{m}$  jsou unášeny nosným plynem dále do systému (tentokrát přímo k tiskové hlavě), kapky větší spadnou zpět na dno PFA vřáku. Výhodou ultrazvukového atomizéru proti pneumatickému je velmi malé potřebné vstupní množství inkoustu (1 ml), nevýhodou je podstatně nižší rozsah využitelných viskozit (1-5 mPa·s). Ultrazvukový atomizér dodává menší množství materiálu než pneumatický, proto je optimální pro velmi jemné tisky tenkými tryskami, nanášení velmi tenkých vrstev materiálu na substrát či testování pokročilých tiskových materiálů, které jsou velmi drahé či náročné na výrobu ve větším množství. [18][19][20]



Obr. 11 Ultrazvukový atomizér

### **Virtual Impactor (VI, viz Obr. 9)**

Virtual impactor (Obr. 12) je součástka vložená mezi pneumatický atomizér a tiskovou hlavu. Jejím úkolem je nejen odstranit případné větší kapky inkoustu, které se mohou z atomizéru dostat, ale hlavně odsát část nosného plynu. Aerosol se tak za součástkou Virtual Impactor stává hustějším a homogennějším. Dále do systému tedy proudí objem nosného plynu mínus objem odsátého plynu (odtah). Tento rozdíl musí být pro tisk vždy větší než nula a jeho velikost určuje množství materiálu dodávaného na substrát. [20][21]



Obr. 12 Virtual impactor

**Bubbler** (B1, B2, viz Obr. 9)

Bubbler je zařízení, které napomáhá tvorbě aerosolu v atomizérech. Je možné jej vložit před oba typy atomizérů. Nosný plyn pak nejprve prochází porézním kamenem a následně náplní v zařízení bubbler (Obr. 13) a pak teprve vstupuje do atomizéru. Bubbler tedy vnáší do atomizéru drobné kapičky ze své náplně. Nejčastěji je používáno stejné rozpouštědlo, ve kterém je připraven i tiskový inkoust. Pro specifické účely lze ovšem použít i jiná rozpouštědla a tak přimíchávat do vznikajícího aerosolu velmi malé množství další látky (např. rozpouštědla s jiným tlakem sytých par apod.). [22]



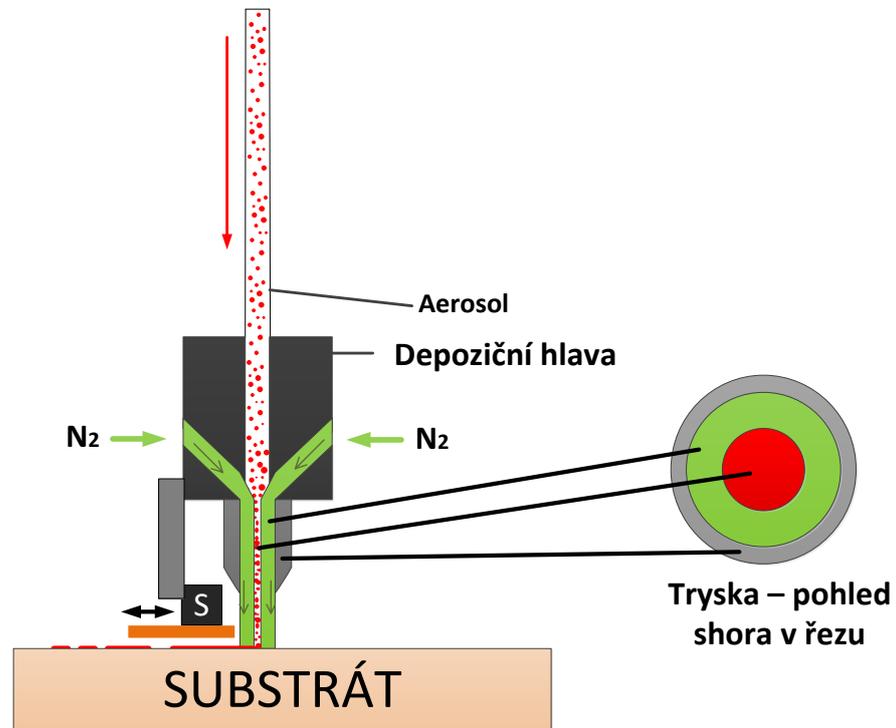
Obr. 13 Bubbler - vnitřní konstrukce se dvěma porézními kameny, přes které prochází nosný plyn do rozpouštědla

**Depoziční hlava**

V depoziční hlavě (Obr. 14) dochází k zaostření vstupujícího aerosolu do tenkého paprsku zaostřovacím plynem a průchodu takto zaostřeného paprsku tiskovou tryskou. Zaostření aerosolu do tenkého paprsku zaostřovacím plynem má následující výhody:

- Při správném nastavení dochází ke kontaktu aerosolu se stěnou trysky jen výjimečně (aerosol je od stěny trysky oddělen zaostřovacím plynem) a tryska je tak odolnější vůči ucpávání,
- Zaostřením aerosolu lze tisknout velmi jemné motivy (šířka linií od 10  $\mu\text{m}$ ) a snadno lze řídit šířku tisknuté linie průtokem zaostřovacího plynu,

- Aerosol je zaostřen až 1 cm od ústí trysky takže i s pouhým 2D polohovacím systémem lze potisknout do určité míry 3D, nerovné či zakřivené substráty (např. tisk do dutiny apod.).



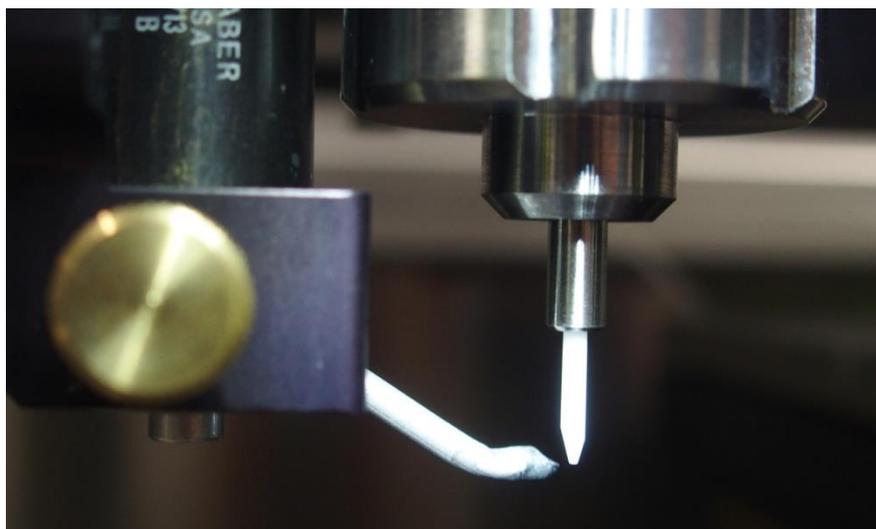
Obr. 14 Detail schématu depoziční hlavy s tryskou

V systému jsou standardně dostupné dva typy depozičních hlav, které využívají různé průměry tiskových trysek – depoziční hlava pro tisk jemných motivů tzv. depoziční hlava fine (Obr. 15) a pro tisk větších motivů tzv. depoziční hlava wide (Obr. 16).

### Depoziční hlava – fine

Depoziční hlava může být použita s pneumatickým i ultrazvukovým atomizérem. Hlava využívá trysky z kombinace kovu jako upevňovacího prvku trysky a keramického hrotu. Trysky jsou dodávány v průměrech otvoru 100, 150, 200, 250 a 300  $\mu\text{m}$ . Tyto trysky jsou vhodné pro jemnější tištěné motivy. Součástí depoziční hlavy je stavítko (S, Obr. 14), které posunutím pod hrot trysky zastavuje deposici na substrát, nikoliv však tvorbu aerosolu.

Stavítko je nezbytné pro tisk nespojitých motivů. Je totiž podstatně rychlejší, než kdyby muselo docházet k zastavování atomizace na jednom místě a opětovnému spouštění atomizace na jiném souřadnicovém místě. Po spuštění atomizace se navíc doporučuje vyčkat na stabilizaci tvorby aerosolu a proudění plynů, její neustálé přerušování by tedy nebylo vhodné. Materiál se při zavřeném stavítku hromadí přímo v něm. Stavítko u depoziční hlavy wide je odsáváno do odpadní nádoby.



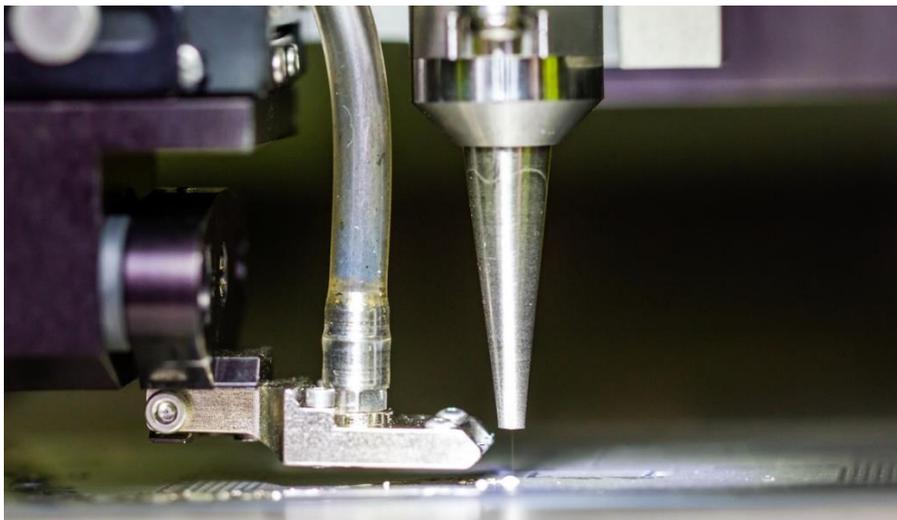
Obr. 15 Depoziční hlava fine s tryskou a stavítkem

### Depoziční hlava – wide

Tato depoziční hlava může být použita pouze s pneumatickým atomizérem. Hlava (Obr. 16) využívá kovové trysky, které jsou standardně dodávány ve 2 konfiguracích:

- Kruhový otvor, průměr 0,75 mm,
- Obdélníkový otvor, 2 × 0,25 mm a 3 × 0,25 mm.

Inkoust nahromaděný v odpadní nádobce lze opětovně použít.



Obr. 16 Depoziční hlava wide s tryskou a stavítkem, pod tryskou je patrný proud aerosolu

### Možnosti technologie

Možnosti technologie Aerosol Jet jsou do značné míry ovlivněny používaným inkoustem, obecně lze ale říci, že technologie má následující možnosti:

- Tisk linií od šířky 10  $\mu\text{m}$  až po 2 mm,
- Tisk tenkých vrstev od 10 nm,
- Viskozita používaných inkoustů 1 – 1000 mPa·s,
- Minimální objem inkoustu pro tisk 1 ml,
- Snadný tisk na nerovné a 3D substráty

Jedním z efektů, který je pro systém aerosol jet běžný jsou často neostrá ohraničení okrajů tisknutých linií či motivů (v porovnání s inkoustovým tiskem). Tento fenomén se nazývá overspray a je způsobován jak vysokou rychlostí aerosolových kapek, které vystupují z trysky tak i průtokem a poměrem nosného a zaostřovacího plynu. Tento efekt může být do značné míry potlačen (Obr. 17), ale nikoliv zcela eliminován. Toho lze docílit např. změnou průtoku zaostřovacího plynu, v tiskovém systému udávaného v sccm/min (standardní kubické centimetry za minutu). [15][23][24]



Obr. 17 Overspray a jeho částečné potlačení zvyšováním průtoku zaostřovacího plynu a) 20 sccm/min b) 60 sccm/min c) 150 sccm/min d) 300 sccm/min; převzato a upraveno z [23]

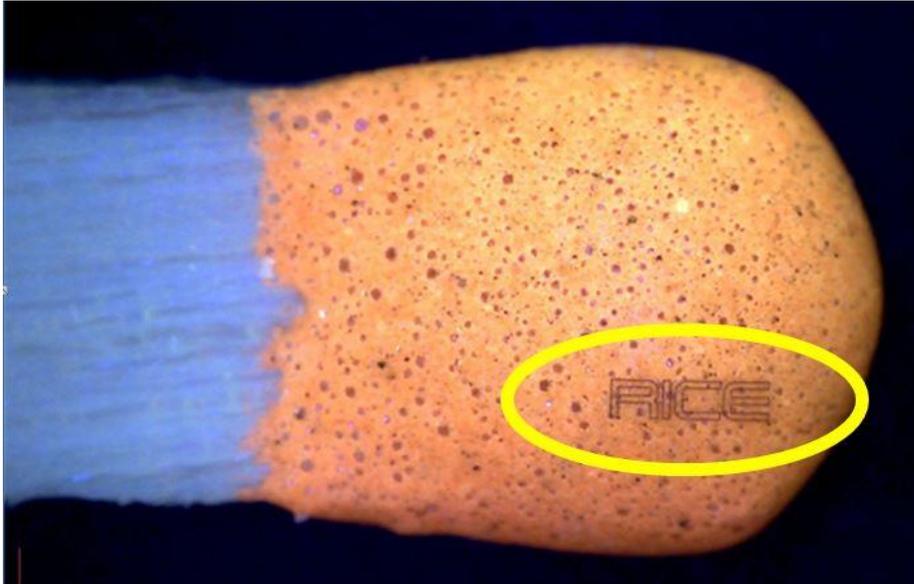
## Materiály

Depoziční systém Aerosol Jet dovede používat velké množství pokročilých materiálů pro tisk. Jediným materiálovým omezením je velikost pevných částic (pokud je inkoust disperzí) do 500 nm a viskozita do 1000 mPa·s. Důležitým požadavkem je také schopnost tvorby aerosolu, kterou lze významně ovlivnit použitými rozpouštědly. [25] V Tabulka 1 jsou uvedeny dle [25] v současnosti dostupné materiály pro technologii Aerosol Jet.

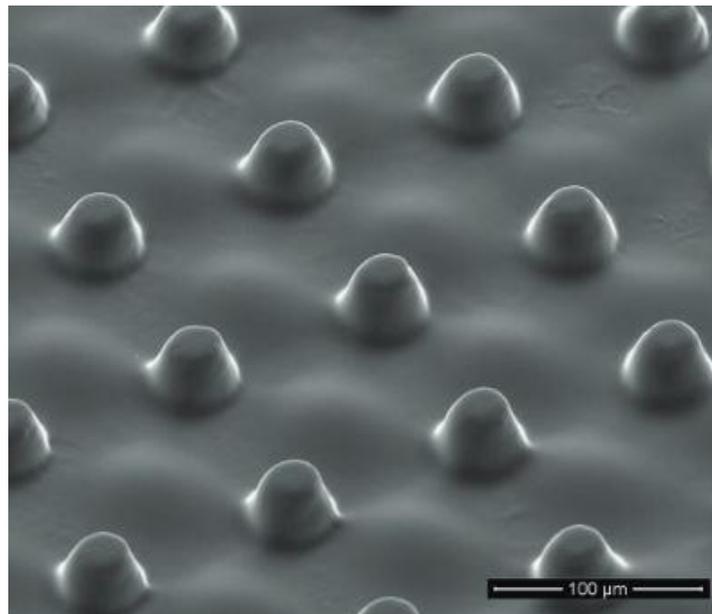
Tabulka 1 Komerčně dostupné materiály pro technologii Aerosol Jet

| vodiče |                            | dielektrika          | ostatní                   |
|--------|----------------------------|----------------------|---------------------------|
| Ag     | Ru                         | polyimid             | rezistory                 |
| Au     | MW CNT                     | PVP                  | leptadla                  |
| Pt     | SW CNT                     | akrylát              | nanodiamanty              |
| Ni     | grafénové materiály        | silikon              | magnetické materiály      |
| Al     |                            | <b>polovodiče</b>    | piezoelektrické materiály |
| Cu     | organické vodivé materiály | organické polovodiče | biologické materiály      |
| C      |                            | CNT                  | (enzymy, bílkoviny, DNA)  |

Pomocí technologie Aerosol Jet lze tisknout nejen na 3D povrchy (Obr. 18) ale také 3D mikrostruktury (Obr. 19) z rozličných materiálů a tím např. pro senzorické aplikace podstatně zvyšovat styčnou plochu analytu s elektrodoým systémem. [26]

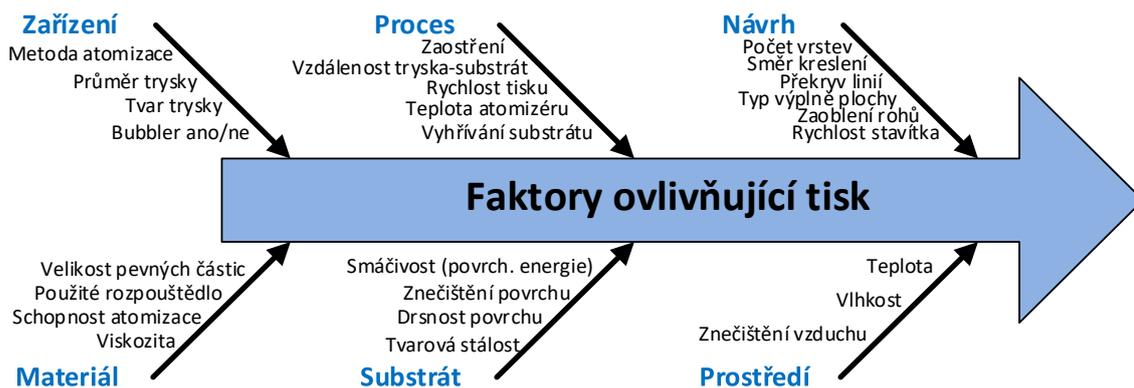


Obr. 18 Ukázka možností technologie Aerosol Jet - tisk s vysokým rozlišením na 3D povrch hlavičky zápalky (logo RICE tištěno zlatým nanočásticovým inkoustem)



Obr. 19 Tisk 3D mikro struktur (kuželů) z fotocitlivého materiálu PETA [26]

Tisk aerosolu (zvláště ve vysokém rozlišení) pomocí zařízení Aerosol Jet je komplexní proces, jehož kvalitu ovlivňuje velká řada faktorů. Některé z nich se musí zohlednit během tisku, některé ale již při samotném návrhu (např. pořadí a směr kreslení linií). Některé z faktorů jsou uvedeny na diagramu na Obr. 20.



Obr. 20 Některé z faktorů ovlivňující tisk pomocí technologie Aerosol Jet; převzato, upraveno a doplněno z [27]

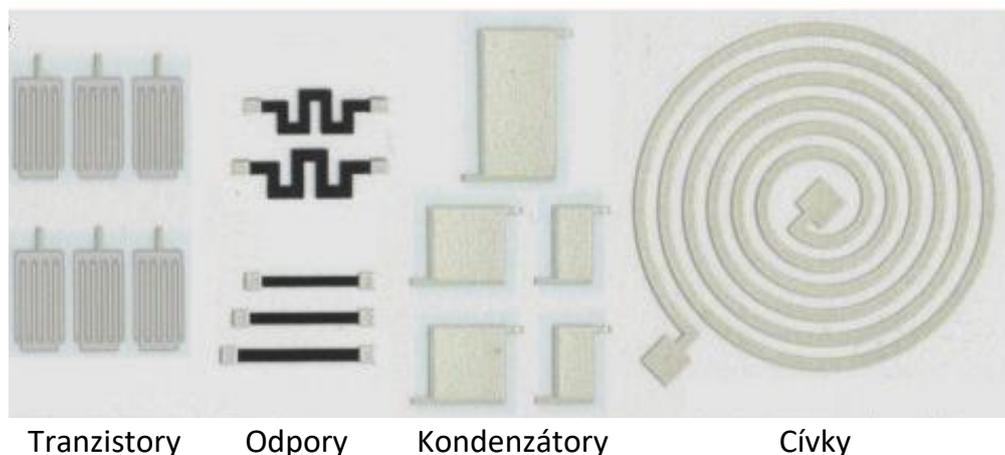
Z výše uvedeného je patrné, že Aerosol Jet nemůže zcela nahradit technologie jako dávkování (dispensing), inkjet či sítotisk. Ostatně nebylo ani účelem projektu MICE vyvinout nástroj který technologie nahradí, ale který je vhodně doplní a poskytne další možnosti, zvláště ve vývoji a výzkumu. Depoziční zařízení od společnosti Ceradrop, které využívá kombinace Aerosol Jet a inkjet tiskové hlavy v jednom stroji.[28] Technologie Aerosol Jet je jedna z nejefektivnějších technologií pro rychlou přípravu funkčních vzorků tzv. rapid prototyping. Umožňuje velmi rychlou změnu motivu a jeho úpravu, tisk širokou škálou inkoustů a na téměř jakýkoliv podklad. Aerosol Jet také vyniká spektrem viskozit použitelných materiálů oproti zavedeným technologiím. Tato technologie je tedy velmi užitečným doplňkem stávajících tiskových technologií, jejichž možnosti zvláště v oblasti nových materiálů na bázi nanočástic značně rozšiřuje a dává další prostor pro vědeckovýzkumný pokrok ve vývoji hybridní tištěné elektroniky (elektroniky vytvářené synergií různých tiskových technologií).

## 1.2 Perspektivní oblasti využití depozičních technologií

Využití tiskových metod je dnes velmi široké a zasahuje nejen do oblasti elektrotechniky a elektroniky, ale často i do oblasti biologie či biotechnologie [29][22][30]. Tiskové metody se dnes hojně využívají jak při hromadné průmyslové výrobě, tak v oblasti vědy a výzkumu. Často se lze v těchto oblastech setkat s použitím různých technologií – využití technologie inkjet či technologie Aerosol Jet pro výrobu prototypu a jeho vylepšování či tisku malé testovací série a po následné optimalizaci parametrů sériová výroba s vysokokapacitními technologiemi jako je sítotisk. Další perspektivní oblastí je hlavně u technologií inkjet a Aerosol Jet testování nových pokročilých (často nanočásticových) materiálů a ověřování jejich potenciálu pro dané využití (např. jako senzorského materiálu). Obrovskou výhodou zde nabízí technologie Aerosol Jet, která je schopna efektivně pracovat s velmi malým vstupním množstvím materiálu (1 ml). Obecně lze využití tiskových technologií rozdělit na dvě části – vytváření propojovacích a funkčních struktur (tj. senzory, elektrody, tištěné součástky, antény atd.) a kontaktování součástek (tj. vytváření vodivých připojení konvenčních SMT součástek).

### 1.2.1 Propojovací a funkční struktury

Vzhledem k širokému spektru materiálů v dnešní době využitelných v tištěné elektronice lze pomocí tiskových metod realizovat celou řadu pasivních [31] i aktivních součástek. Z hlediska výroby pasivních komponent je možnost tisku odporových drah pro tištěné rezistory [32][33], sendvičových či interdigitálních struktur obsahujících elektrody a dielektrika pro tištěné kondenzátory [34][35][36] či tisk různých topologií cívek (Obr. 21).



Tranzistory

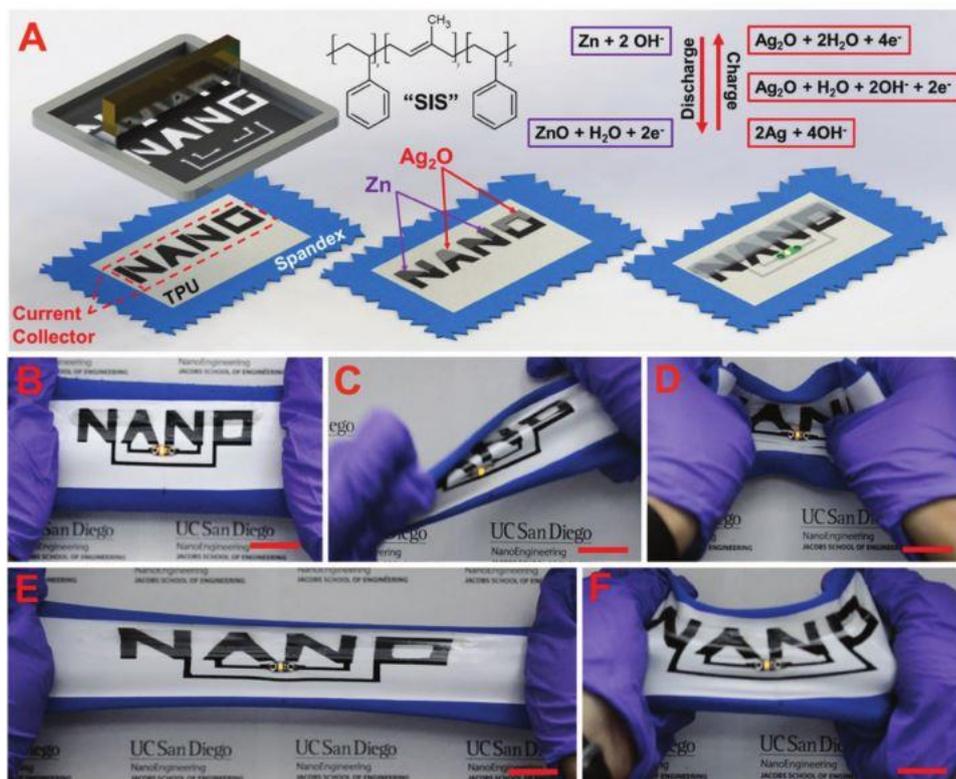
Odpory

Kondenzátory

Cívky

Obr. 21 Plně tištěné součástky, převzato a upraveno z [37]

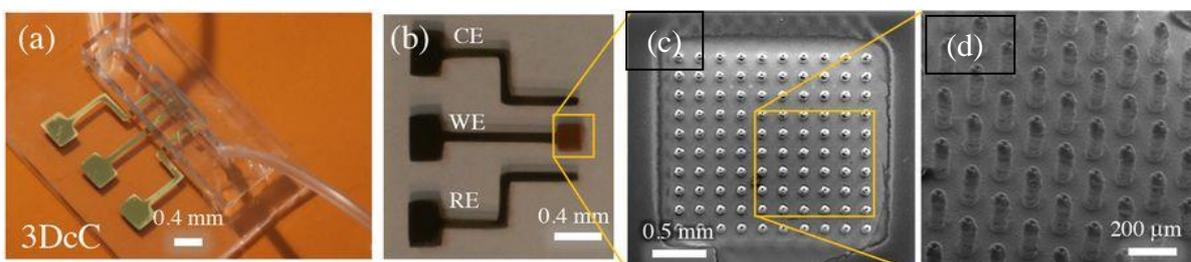
Rozvoj tištěné elektroniky přinesl také potřebu umět vyrábět tištěné flexibilní baterie. Baterie jsou často vyráběny pomocí technologie sítotisku a mají obrovský potenciál hlavně pro nositelnou elektroniku (wearables). [38][39] Některé takové baterie jsou nejen flexibilní ale i natahnutelné až na 200 % (viz Obr. 22) své původní délky při zachování své funkce [40].



Obr. 22 Struktura a testování (natahování, deformování) tištěné baterie [40]

Velkou kapitolou je výzkum a vývoj plně tištěných senzorů. Elektrodová struktura plně tištěného senzoru bývá obvykle připravována tiskem vodivých nanočásticových materiálů jako je stříbro, platina či zlato. Velmi zajímavou oblastí je ale i samotná senzitivní vrstva tištěná na elektrodové struktuře. Zde je asi nejvíce využíváno možnosti tisknout speciální, často nanočásticové materiály ve velmi tenkých vrstvách a zkoumat jejich potenciál jako senzoru v rámci materiálového výzkumu [41]. Z plně tištěných senzorů jsou v současnosti zkoumány např. senzory teploty, vlhkosti [42][43], senzory široké škály plynů [44][45], ale i senzory pro biologické aplikace, např. tištěné pH senzory [29], senzory kyseliny askorbové [46] či senzory na bázi CNT pro biomarkery [47] a další.

V současné situaci světové pandemie SARS-CoV-2 byly také představeny a úspěšně otestovány plně tištěné senzory protilátek proti tomuto viru (Obr. 23), vytvořené pomocí technologie Aerosol Jet. [48] Zde bylo úspěšně využito všech vlastností této technologie – rychlý návrh a případné úpravy motivu (rapid prototyping), vysoké rozlišení tisku a možnosti tisku mikro 3D struktur, které mohou podstatně zvýšit citlivost senzoru. V tomto případě byly mikro 3D struktury vytvořeny zlatým nanočásticovým inkoustem. Představená sensorová platforma je velmi univerzální a lze ji přizpůsobit i pro detekci protilátek proti jiným virům (Ebola, Zika, HIV) [48].



Obr. 23 Rozložení (a), elektrodový systém (b) a pole mikro 3D struktur (c,d) tištěného senzoru protilátek proti onemocnění COVID-19; převzato a upraveno z [48]

Dále mezi senzory patří také senzory mechanického napětí – tenzometry. V tištěné verzi využívají výhody, že moderními tiskovými technologiemi lze tisknout velmi jemné motivy na 3D povrchy a senzor lze tak vytvořit v miniaturizované verzi i na pozici, kam by konvenční tenzometr nebylo možné umístit jako např. na Obr. 24. [49] [50]



Obr. 24 Aerosol Jet tištěný tenzometr o délce 200  $\mu\text{m}$  na lopatce kompresoru tryskového motoru, převzato a upraveno z [49]

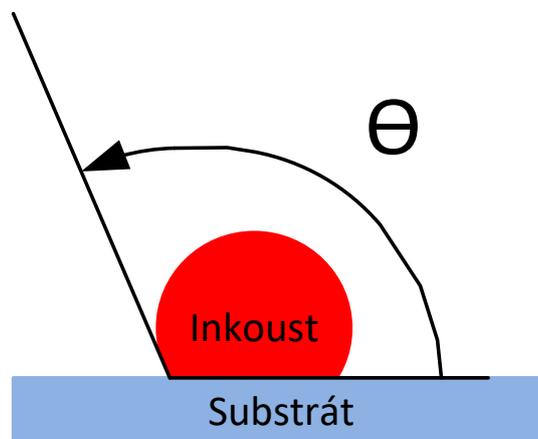
### 1.2.2 Kontaktování součástek

Elektrotechnické součástky lze kontaktovat několika klasickými způsoby. Jedním z nejpoužívanějších a nejspolehlivějších je pájení, tj. připojení kontaktní plošky k součástkovému vývodu pomocí roztavené pájecí slitiny. Průmyslové pájení lze realizovat vlnou či přetavením. Při pájení přetavením je běžně využíváno tiskových technologií, nejčastěji technologie dávkování či šablonového tisku pro depozici pájecí pasty. Nevýhodou pájení je velmi malá mechanická flexibilita spoje a poměrně vysoké teploty zpracování. Tyto vlastnosti nejsou příliš vhodné pro moderní vysoce ohebné a nízkoteplotní substráty jako jsou např. PET fólie, biodegradabilní materiály apod. Moderní tiskové technologie dovedou využívat materiály, které mají teplotu zpracování velmi nízkou a zároveň poskytují dobrou elektrickou vodivost a částečnou mechanickou flexibilitu. Kontaktování lze provést několika způsoby:

- Fixace součástky a tisk materiálu k vývodu součástky [51][50][49][48],
- Fixace součástky, vytvoření dielektrického menisku a tisk,
- Mechanický kontakt při využití nevodivého lepidla [52],
- Mechanický kontakt při využití nevodivého lepidla posílený polem vodivých mikro 3D struktur na kontaktní plošce [53].

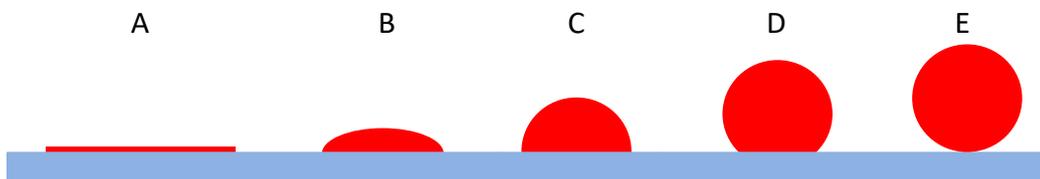
### 1.3 Plasmatická úprava povrchů

Při používání tiskových technologií hrají důležitou roli v kvalitě tisku vlastnosti povrchu substrátů. Jedním z nejdůležitějších parametrů, ovlivňující jak tiskové vlastnosti, tak výslednou adhezi inkoustu k povrchu je velikost kontaktního úhlu mezi inkoustem a substrátem (Obr. 25).



Obr. 25 Kontaktní úhel

Kontaktní úhel  $\Theta$  vypovídá o kvalitě smáčení substrátu daným inkoustem (Obr. 26 a Tabulka 2). Vysoká míra smáčení (označeno na Obr. 26 jako A) může mít za následek silnou tvarovou nestálost tištěného motivu a rozlévání inkoustu po substrátu. Stejně tak jako nulová smáčivost (označeno na Obr. 26 jako E), která má za následek tvorbu samostatných kapiček inkoustu a tedy opět nemožnost kvalitního tisku. To ovšem neznamená, že tyto stavy jsou pro všechny aplikace vždy nežádoucí. Například v případě potřeby vytvoření velmi tenké vrstvy (bez nutnosti přesného tvarového ohraničení) respektive zamezení smáčení substrátu (např. hydrofobní skla automobilů) jsou tyto krajní stavy žádoucí. Pro účely tisku je nejvíce žádoucí stav B až C na Obr. 26. [54] [55]

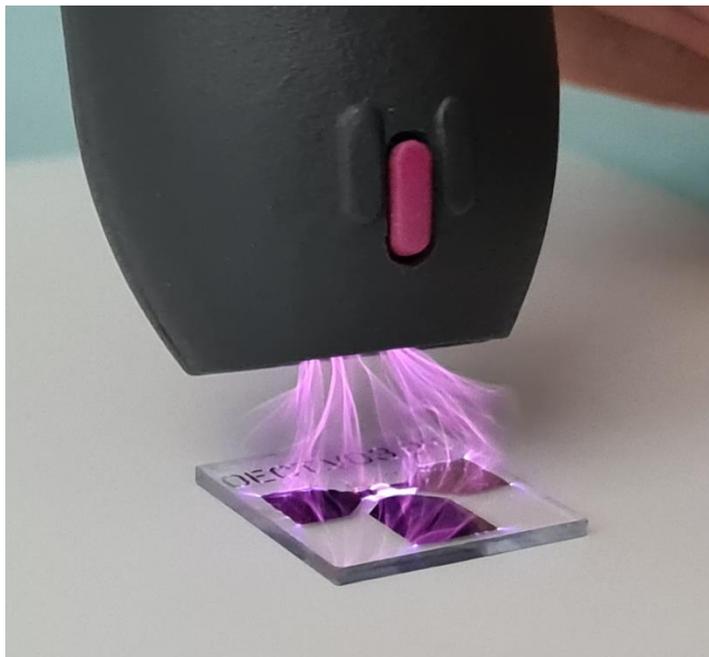


Obr. 26 Různé úrovně smáčení povrchu kapalinou

Tabulka 2 Kontaktní úhly mezi kapalinou a pevnou látkou

| Vzorek | Kontaktní úhel $\Theta$ | Smáčivost            |
|--------|-------------------------|----------------------|
| A      | $0^\circ$               | Úplná                |
| B      | $(0^\circ-90^\circ)$    | Velmi dobrá          |
| C      | $90^\circ$              | Dobrá                |
| D      | $(90^\circ-180^\circ)$  | Špatná               |
| E      | $180^\circ$             | Nedostatečná (žádná) |

Povrchovou energii substrátů lze měnit různými způsoby - nátěry, zdrsněním, oplachem rozpouštědlem, impregnací atd. Jednou z moderních metod, jak lze zvyšovat povrchovou energii substrátu je právě plasmatická aktivace. [56] Moderní technologie využívají proudy plasmatu (elektricky nabitého plynu s vysokou energií) vytvářeného za atmosférického tlaku a bez použití formujících plynů (Obr. 27). Například systémy použité v této práci vytvářejí uvnitř trysky plasmatu pomocí rotujícího elektrického výboje či přímého piezoelektrického výboje. Plasmatické systémy takto vytvořený plasmatu vytahují proudem plynu (vzduchu či dusíku) tryskou ven. [57]



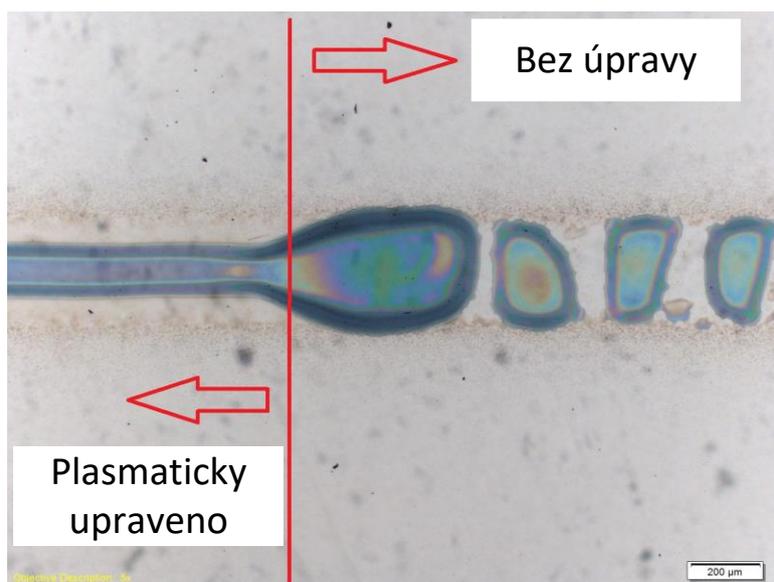
**Obr. 27** Plasmatická úprava povrchu skleněného substrátu s elektrodami pro organický elektrochemický tranzistor před tiskem vodivého kanálu z organického materiálu PEDOT:PSS

Plasmatická úprava nejen zvyšuje povrchovou energii substrátu, ale dovede odstraňovat i mastnotu a organické nečistoty nebo desinfikovat povrch. Plasmatická úprava substrátů není trvalá, jejich povrchová energie je zvýšena pouze dočasně (v řádu minut až hodin) a je tedy vhodné provádět plasmatickou aktivaci povrchu těsně před dalším technologickým krokem (např. tiskem). [57] [58] [59]

### **1.3.1 Kompatibilita substrátu a inkoustu**

Jednou z podmínek pro kvalitní tisk inkoustu je jeho kompatibilita se substrátem. Tu můžeme rozdělit na kompatibilitu chemickou (rozpouštědla v inkoustu by neměla substrát výrazněji degradovat či s ním reagovat) a fyzikální. Pod kompatibilitou fyzikální si lze představit nejen teplo (vytvrzovací teplota inkoustu vs. tepelná odolnost substrátu) ale právě i smáčení. Pro tištěnou elektroniku je dobrá kvalita smáčení inkoustu velmi důležitá. Nutno říci, že naprostá většina výrobců inkoustů/past uvádí kompatibilní typy substrátů pro své typy inkoustů a velká většina z nich je na běžně používané substráty použitelná i bez plasmatické úpravy. Problémy se smáčením či adhezí mohou nastat nejčastěji při tisku na teflon či PET fólie či při tisku na běžně nevyužívané speciální materiály zvláště pro výzkumné aplikace. Pro moderní elektroniku založenou

na organických materiálech (např. PEDOT) či uhlíkových nanostrukturách inkoustů (uhlíkové nanotrubičky, grafen) je ale často úprava a zvýšení povrchové energie substrátu pro dosažení kvalitního tisku (případně tisku velmi tenkého filmu) naprosto nezbytná. Na Obr. 28 je patrný přechod mezi plasmaticky upravenou a neupravenou částí PET substrátu. Tisknutá linie je z materiálu PEDOT:PSS a byla vytvořena technologií Aerosol Jet. Zvláště při aplikacích ve vědě a výzkumu (testování a vývoj nových materiálů) se lze setkat s tiskem vícevrstevných struktur z materiálů, které dosud nebyly na vzájemnou kompatibilitu testovány. Je tedy důležité si uvědomit, že např. při tisku organického materiálu na elektrodu z nanočásticového inkoustu může tvořit substrát pro nanočásticový inkoust fólie která je s oběma materiály kompatibilní, ovšem substrátem pro tisk organického materiálu je již tištěná vrstva nanočásticového inkoustu, který kompatibilní s organickou vrstvou být již nemusí.



Obr. 28 Tisk materiálu PEDOT pomocí technologie Aerosol Jet

## 2 Cíle disertační práce

Na základě současného stavu poznání byly stanoveny tyto cíle disertační práce:

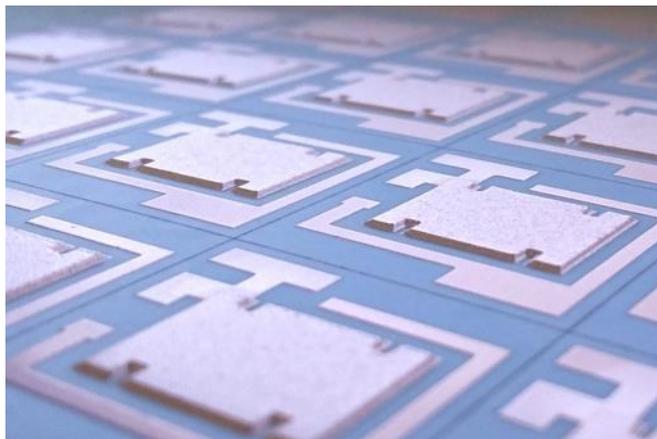
1. **V oblasti technologie vytváření a kontaktování elektronických součástek tiskovými metodami**
  - Návrh, realizace a kontaktování součástek pro TPC technologii.
  - Návrh a realizace kontaktování konvenčních SMT součástek pro flexibilní nízkoteplotní substráty
  
2. **V oblasti tištěných senzorů realizace plně tištěných sensorových elementů**
  - Vytvoření sensorového elementu použitelného na vlákněných strukturách (tzv. thread like structures).
  - Návrh topologie, realizace a ověření sensorových struktur pro planární elektrochemické senzory.

### 3 Technologie vytváření a kontaktování elektronických součástek tiskovými metodami

V následujících kapitolách je popsáno využití tisku aerosolu pro vytváření plně tištěných součástek na keramických substrátech pro hybridní obvody. Je také popsána možnost využití technologie tisku pro kontaktování konvenčních součástek k substrátům.

#### 3.1 TPC technologie

Tlustovrstvá technologie je soubor nástrojů, postupů a materiálů pro výrobu hybridních obvodů na keramických substrátech (obvykle na korundové keramice  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tato technologie je založena na tisku vodivých past přímo na keramický substrát. Jako tlustou vrstvu lze označit tištěnou pastu od tloušťky 5  $\mu\text{m}$ . Využívané organometalické vodivé pasty mohou být založeny na bázi platiny, zlata, stříbra či mědi. Pokud je použita pasta na bázi mědi, nazýváme tuto technologii TPC (thick printed copper). Alternativou technologie TPC je technologie DBC (direct bonded copper). Zde dochází k přímému spojování kovové mědi s keramickým materiálem substrátu. Pro kvalitní spojení mědi se substrátem je nutné kovovou měď roztavit či alespoň natavit kontaktní mezivrstvu. Tento proces s sebou nese řadu nepříjemností – vysokou teplotu zpracování, tvarovou nestálost roztaveného kovu a z ní plynoucí nízké rozlišení či vyšší pravděpodobnost delaminace kovové mědi při cyklických změnách teplot. Výhodou je možnost spojovat se substrátem měď až do tloušťky 800  $\mu\text{m}$ . Oproti tomu technologie TPC umožňuje selektivní tisk vícevrstevných struktur, tj. na keramické podložce mohou být snadno vytvořeny motivy s rozdílnou tloušťkou (Obr. 29). Dále technologie TPC poskytuje vyšší rozlišení výsledného motivu, větší odolnost vůči cyklickým změnám teplot a relativně snadnou technologii výroby. Měděné pasty jsou obvykle tištěny sítotiskem či šablonovým tiskem a tloušťka vrstev se může pohybovat zhruba do 300  $\mu\text{m}$ . Lze také vytvářet pokovené otvory. Technologie TPC umožňuje kontaktování konvenčních elektronických součástek, ale je také možné vytvářet součástky (např. rezistory) tiskem přímo na substrát.



Obr. 29 TPC technologie - selektivní tisk vícevrstevných struktur

### 3.1.1 Návrh a realizace tištěných součástek pro TPC technologii

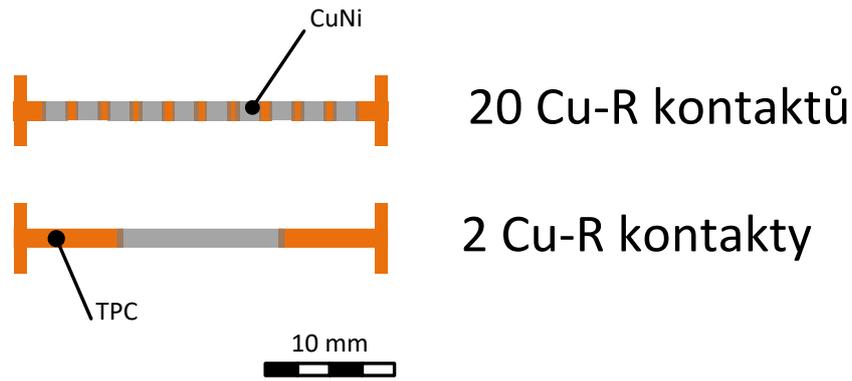
TPC technologie umožňuje vytváření plně tištěných součástek na jejím povrchu. Experimenty byly zaměřeny na tisk odporové vrstvy rezistorů s tlustovrstvými měděnými terminály pomocí technologie Aerosol Jet, stanovení odporu vrstvy, jejího TCR koeficientu a stanovení změny těchto parametrů během zkoušky zrychleného stárnutí suchým teplem dle ČSN EN 60068-2-2. Výpočet TCR byl proveden dle následujícího vzorce (1),

$$TCR = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (1)$$

kde  $R_0$  je počáteční hodnota odporu,  $\Delta R$  je rozdíl odporů (pro měřené teploty - zde 0 °C a 100 °C) a  $\Delta T$  je rozdíl teplot (zde 100 K).

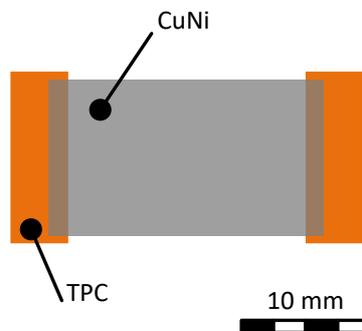
#### 3.1.1.1 Testovací motivy a tiskový materiál

Jako první testovací motiv byl zvolen tzv. IRP motiv (intermittent resistor pattern, Obr. 30), což je motiv, který slouží ke stanovení kontaktního odporu mezi terminály a odporovou vrstvou. Odporová vrstva byla tištěna na dva motivy. Jeden tvořilo 10 rezistorů (tj. 20 kontaktů Cu – odporový materiál) a druhý jeden rezistor (tj. 2 kontakty Cu – odporový materiál).

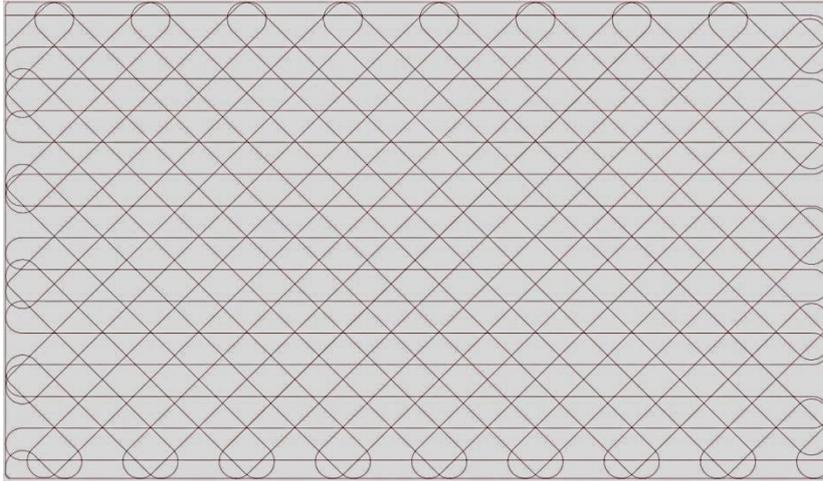


Obr. 30 IRP motiv

Jako druhý testovací motiv byl zvolen obdélníkový rezistor o obsahu přibližně 2 cm<sup>2</sup> (Obr. 31). Rezistor byl tištěn vícevrstvě, znázornění tisku tří vrstev je na Obr. 32. Jako odporový materiál pro rezistory obecně je využíván často tzv. konstantan (obvykle slitina 55% Cu a 45% Ni), který má jen velmi malou závislost odporu na teplotě. Matriálem pro tisk byl tedy zvolen komerčně dostupný inkoust na bázi nanočástic Cu a Ni, CuNi-OC5050 od firmy Applied Nanotech (dnes již Nano Magic).



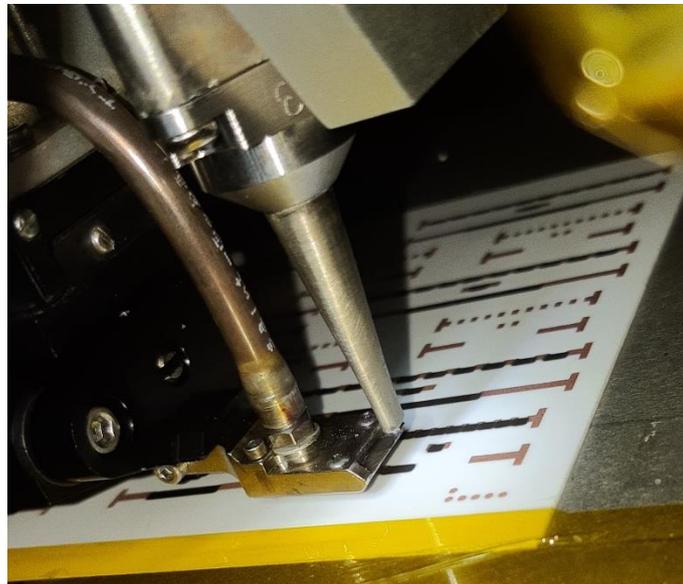
Obr. 31 Motiv tištěného rezistoru



Obr. 32 Trajektorie pohybu tiskového zařízení pro tisk rezistoru ve třech vrstvách (0°, 45° -45°)

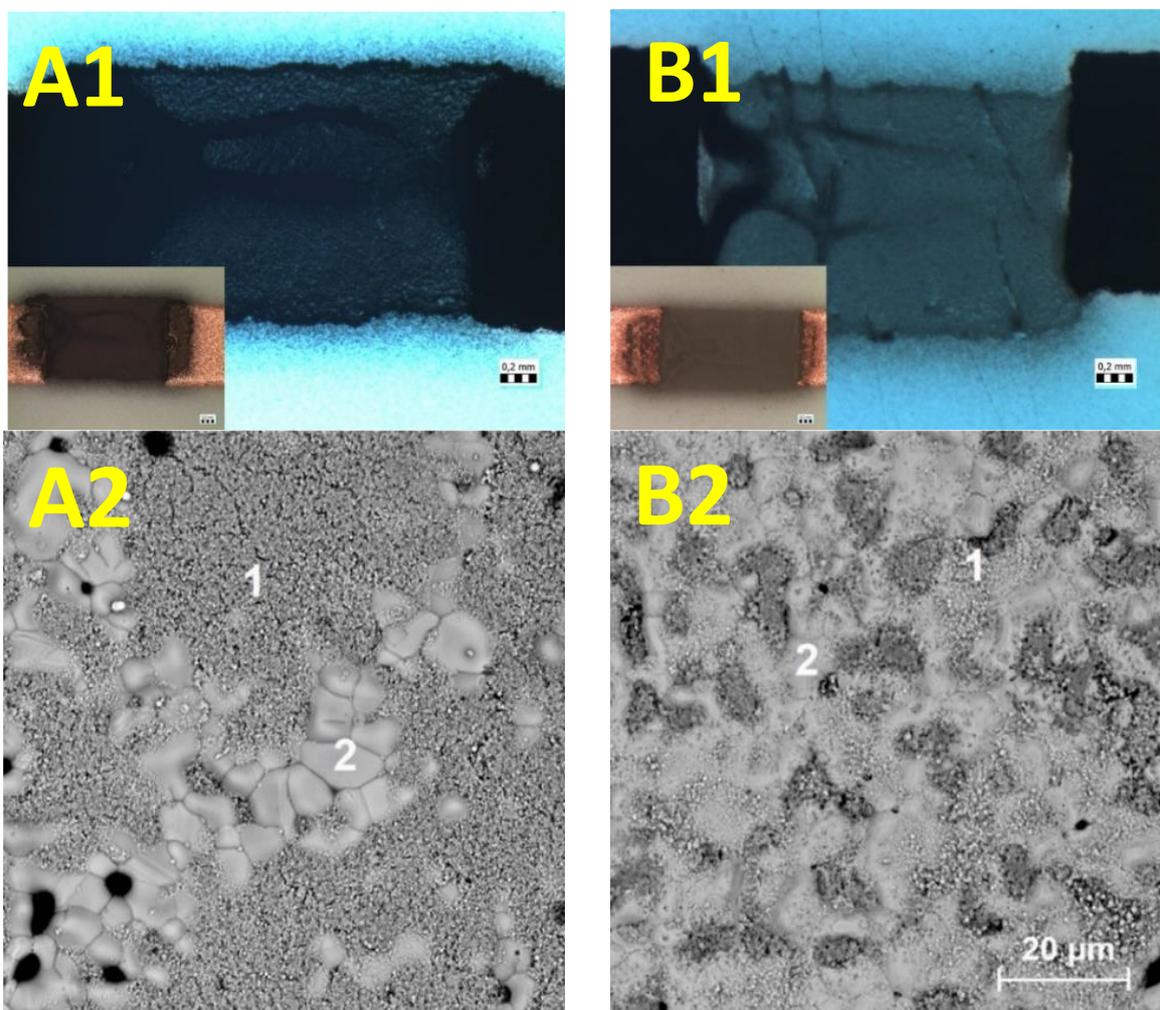
### 3.1.1.2 Příprava vzorků a měření

Jelikož zamýšlená plocha tisku byla relativně velká a bylo potřeba nanášet větší množství materiálu, byl pro tisk zvolen pneumatický atomizér s širokou konfigurací depoziční hlavy - wide (viz kapitola 1.1.4) s kruhovou tryskou o průměru 0,75 mm.



Obr. 33 Tisk CuNi rezistorů technologií Aerosol Jet

V první fázi testování byl motiv tištěný v jedné vrstvě, následně byl zasušen v laboratorní sušičce (120 °C, 30 min) a vypálen v peci v ochranné dusíkové atmosféře. Při výpalu byly testovány dvě různé teploty: 420 °C a 960 °C. Teplotní profil výpalu se shodoval s profilem výpalu TPC vrstvy. Bylo patrné, že jedna tištěná vrstva je velmi tenká, její odpor se pohyboval v řádech kΩ až MΩ. Z mikroskopické inspekce po výpalu bylo také patrné, že při výpalu na vyšší teplotu došlo k podstatně lepšímu slinování vrstvy CuNi, proto byl již v dalších experimentech využíván profil výpalu 960 °C. Díky možnosti vyhřívání tiskového stolku je možné tisknout několik vrstev se zasušením mezi jednotlivými tisky bez jakékoliv manipulace se vzorky. Pro měření byly tištěny rezistory se 4 vrstvami CuNi inkoustu. Nastavení vybraných tiskových parametrů je uvedené v Tabulka 3.



Obr. 34 Vzorek po výpalu na 420 °C (A1) a detail (A2), vzorek po výpalu na 960 °C (B1) a detail (B2); na snímcích A2 a B2 jsou označeny číslem 1 oblasti se slinutou CuNi vrstvou a číslem 2 oblasti Cu vývodů

Tabulka 3 Nastavení tiskových parametrů TPC rezistorů

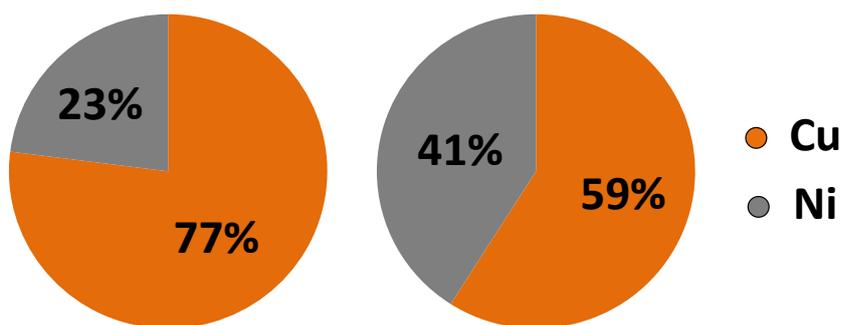
|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>Průměr trysky</b>              | 0,75 mm   |
| <b>Nosný plyn</b>                 | 1200 sccm |
| <b>Zaostřovací plyn</b>           | 80 sccm   |
| <b>Odtah</b>                      | 1000 sccm |
| <b>Rychlost tisku</b>             | 4 mm/s    |
| <b>Vyhřívání tiskového stolku</b> | 80 °C     |

V následujícím kroku byl dle rovnice (1) z naměřených dat dopočítán teplotní součinitel odporu takto vytvořených rezistorů. Pro každý typ byly změřeny tři vzorky a jejich průměrné hodnoty jsou v Tabulka 4.

Tabulka 4 Změřené parametry rezistorů

| <b>Vzorek</b> | <b>TCR (<math>10^{-6} K^{-1}</math>)</b> | <b>R (<math>\Omega</math>)</b> |
|---------------|--|--------------------------------|
| 2 kontakty    | $\pm 186,8$                              | 1,97                           |
| 20 kontaktů   | $\pm 201,3$                              | 2,54                           |

Protože hodnoty TCR byly poměrně vysoké, byla provedena prvková analýza vypálené vrstvy za účelem potvrzení či vyvrácení hypotézy, že inkoust obsahuje jiný poměr Cu a Ni částic než výrobce deklaruje. Výrobce deklarovaných 50 : 50 bylo prvkovou analýzou vyvráceno. Z analýzy vyplynulo, že dodaný inkoust obsahoval větší hmotnostní podíl částic Cu na úkor částic Ni. Inkoust byl po dohodě s výrobcem upraven tak, aby lépe vyhovoval deklarovaným parametrům.



Obr. 35 Původní složení inkoustu (vlevo) a upravené složení (vpravo)

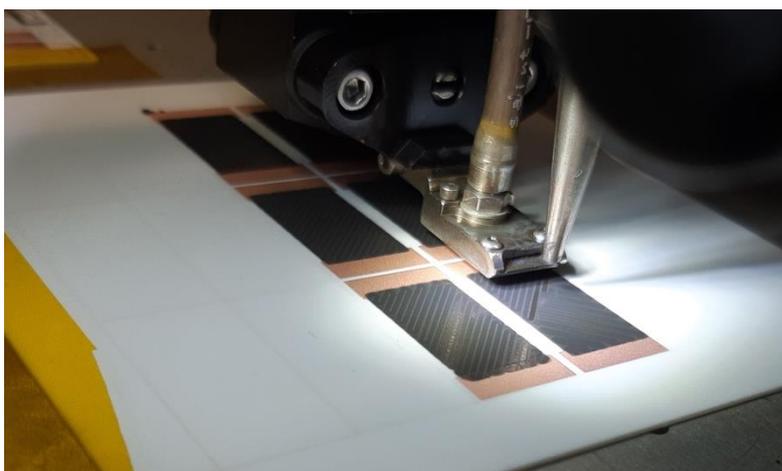
V následujícím tisku se již pracovalo s upraveným složením inkoustu. Úprava tiskového inkoustu způsobila nejen změnu poměru Cu a Ni částic, ale i změnu jeho viskozity. Pro snížení odporu vrstvy bylo dále tištěno kromě jedné také šest vrstev, které byly postupně vypalovány. Výpal více vrstev CuNi inkoustu v jednom kroku totiž způsoboval občasnou delaminaci tištěné vrstvy. Následující vzorky byly tedy připraveny stylem tisk jedné vrstvy

– vypálení – tisk dvou vrstev – vypálení – tisk tří vrstev – vypálení. Nutností bylo samozřejmě správné sesazení vzorků v tiskovém zařízení tak, aby byly nové vrstvy tištěné na přesně stejné místo jako byly již tištěny vrstvy, které byly vypáleny a tvořily podklad pro tisk dalších vrstev. Tloušťka jedné vrstvy po výpalu byla přibližně 2  $\mu\text{m}$ , tloušťka šesti vrstev dosahovala přibližně 10  $\mu\text{m}$ . Vzorky byly vystaveny testu zrychleného stárnutí v klimatické komoře pomocí suchého tepla (155 °C, 1000 h, dle normy ČSN EN 60068-2-2) a byla sledována změna odporu a koeficientu TCR. Výsledky z měření jsou uvedeny v Tabulka 5.

**Tabulka 5 Změřené parametry rezistorů pro nové složení inkoustu**

| Počet vrstev | Vzorek      | TCR ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) | Změna TCR po testu (%) | R ( $\Omega$ ) | Změna R po testu (%) |
|--------------|-------------|----------------------------------|------------------------|----------------|----------------------|
| 1            | 2 kontakty  | $\pm 101,0$                      | $\pm 5,31$             | 60,18          | $\pm 4,31$           |
|              | 20 kontaktů | $\pm 102,8$                      | $\pm 9,39$             | 78,93          | $\pm 6,03$           |
| 6            | 2 kontakty  | $\pm 102,5$                      | $\pm 18,40$            | 20,33          | $\pm 27,87$          |
|              | 20 kontaktů | $\pm 100,9$                      | $\pm 8,60$             | 24,99          | $\pm 33,14$          |

Dále byly experimentálně tištěny rezistory s velkou plochou pro výkonové aplikace (Obr. 36). Tisky byly realizovány s upraveným složením inkoustu.



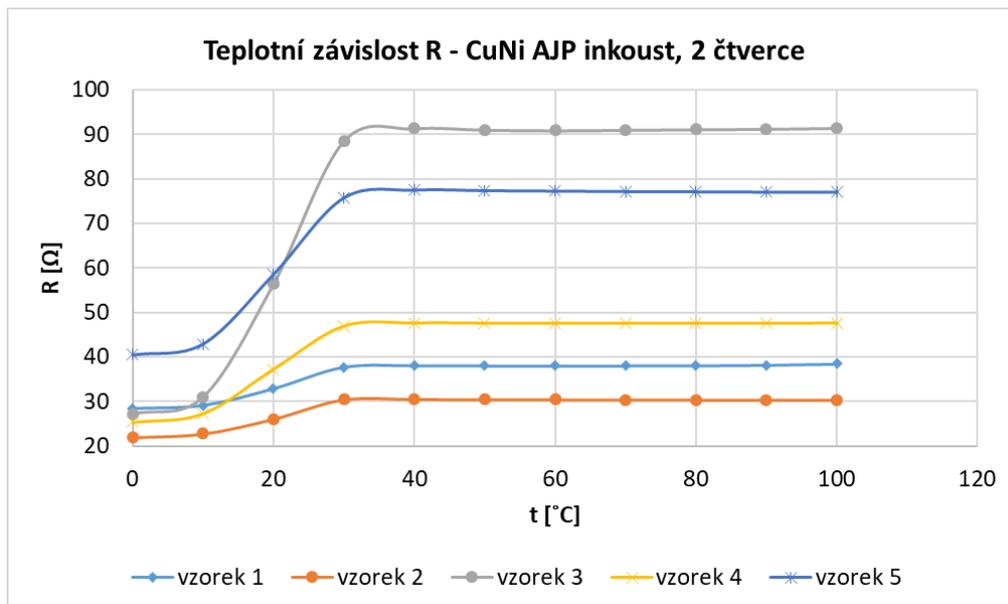
**Obr. 36 Tisk CuNi rezistorů; tisk třetí vrstvy pod úhlem -45°**

Velká plocha a menší tloušťka vrstvy je pro výkonové rezistory výhodnější hlavně z hlediska jejich účinného chlazení. Rezistory byly tištěny v šesti vrstvách (stylem tisk tří vrstev – výpal – tisk tří vrstev - výpal). První vrstva byla tištěná pod úhlem 0°, druhá pod

úhlem  $45^\circ$  a třetí pod úhlem  $-45^\circ$  (Obr. 32). Bylo tak dosaženo homogennějšího pokrytí plochy než pokud by byly všechny vrstvy tištěny pod stejným úhlem. Výsledky měření TCR a závislost odporu na teplotě jsou uvedeny v Tabulka 6, respektive na Obr. 37.

Tabulka 6 Změřené parametry plošných rezistorů

| Vzorek | TCR ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) |
|--------|----------------------------------|
| 1      | $\pm 95,7$                       |
| 2      | $\pm 51,7$                       |
| 3      | $\pm 10,6$                       |
| 4      | $\pm 38,7$                       |
| 5      | $\pm 62,1$                       |



Obr. 37 Závislost odporu na teplotě pro jednotlivé vzorky

### 3.1.1.3 Vyhodnocení

V rámci provedených experimentů byla úspěšně prokázána možnost vytvářet plně tištěné funkční součástky pro TPC technologii pomocí technologie tisku aerosolu. U testů s IRP motivem byl TCR realizovaných vzorků byl přibližně  $100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a odpor přibližně  $1 \Omega / \text{čtverec}$ . Odpor lze snižovat postupným tiskem dalších vrstev. Byla experimentálně ověřena funkčnost a stabilita výkonových rezistorů s velkou plochou. Takto vytvořeným rezistorům lze také nastavit přesnou hodnotu pomocí trimování (laserové odstranění části odporového materiálu). Technologie Aerosol Jet v tomto případě výborně posloužila jako prototypovací zařízení – byl experimentálně ověřen koncept plně tištěných rezistorů na bázi CuNi inkoustu a dalšími kroky bude vývoj v současnosti komerčně nedostupné CuNi pasty pro hromadnější technologie výroby (hl. sítotisk) než je technologie Aerosol Jet. Koncept tisku rezistorů nanočásticovým inkoustem na bázi Cu a Ni pomocí technologie Aerosol Jet byl také patentován pod názvem „Způsob výroby rezistoru pro výkonové aplikace“, číslo patentu CZ 308757 B6.

### 3.1.2 Kontaktování součástek pro TPC technologii

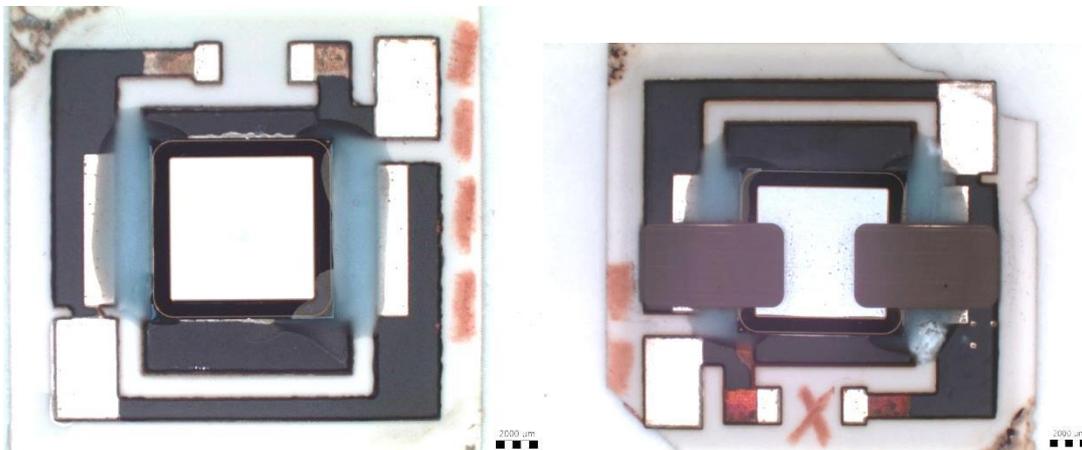
Jak již bylo řečeno výše, technologie TPC umožňuje samozřejmě i osazování a kontaktování konvenčních elektronických součástek. Tyto součástky jsou klasicky kontaktovány bondováním, tj. přivařením drátků k vývodu součástky a plošce na desce (Obr. 38). Tento způsob je prostorově náročnější než propojení pomocí tiskové technologie, protože drátek vytváří ohyb nad úrovní čipu a znesnadňuje (či vůbec neumožňuje) montáž chladiče z horní strany a zvyšuje tloušťku celé desky.



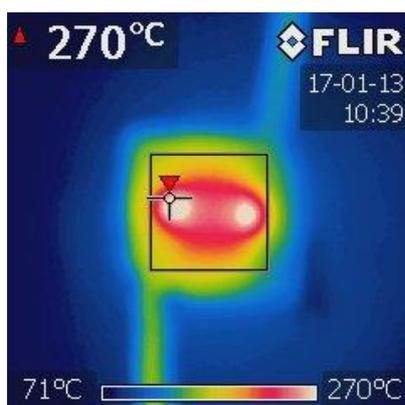
Obr. 38 Bondované kontaktování na TPC substrátu

Tiskovou technologií Aerosol Jet je oproti bondování možné vytvořit velmi planární kontakt s velkou plochou a umožnit tak např. podstatně lepšího odvodu ztrátového tepla od součástky (případně díky planárnosti umožnit montáž chladiče i shora). Realizace kontaktů tiskem může být rovněž rychlejší. V rámci experimentů bylo testováno připojení čipů výkonových diod a čipů pro koncentrovanou fotovoltaiku (CPV, viz Obr. 41) v kombinaci s technologií tištěných tlustých vrstev mědi (TPC). U čipů výkonových diod bylo experimentálně ověřeno, že tištěné připojení (8 vrstev stříbrného inkoustu) je schopné bez poškození přenášet proud 36 A. Během realizace spoje byly nejprve vyrovnány skokové výškové rozdíly mezi čipem a deskou pomocí UV tvrditelného dielektrika Smart Fabric Inks UV-D1 naneseného technologií dávkování dutou jehlou. Elektrické kontakty byly vytvořeny technologií Aerosol Jet stříbrným nanočásticovým inkoustem Clariant Prelect TPS50 s 50% obsahem stříbra. Tisk byl proveden v osmi vrstvách a na závěr byl inkoust vytvrzen v laboratorní sušičce při teplotě 200 °C po dobu 30 minut (Obr. 39). Substrát s výkonovou diodou byl přes teplovodivou pastu připevněn na hliníkový chladič a opatřen černým matným nátěrem. Na diodu byl přiváděn stejnosměrný proud a při každé

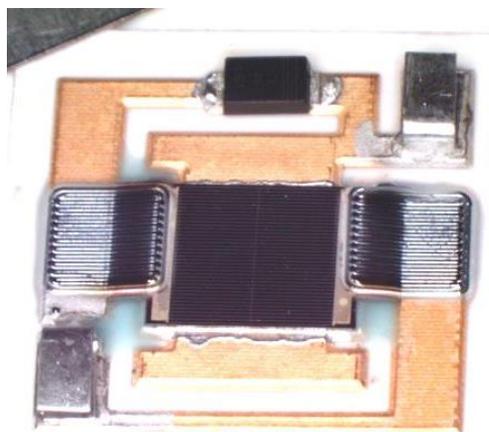
hodnotě proudu (12 A, 16 A, 20 A, 24 A, 28 A, 32 A a 36 A) byl po 5 minutách pořízen snímek termokamerou (Obr. 40). Kontaktní odpor pro 8 vrstvé tištěné kontaktní struktury byl přibližně 45 mΩ.



Obr. 39 UV tvrditelné dielektrikum (modré) nanesené dávkováním (vlevo) a čip výkonové diody kontaktovaný technologií Aerosol Jet (vpravo)



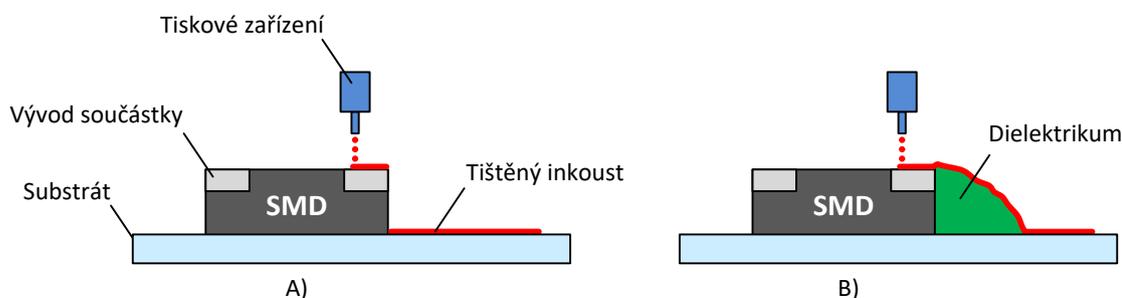
Obr. 40 Termovizní snímek kontaktované diody po 5 minutovém zatížení proudem 32A



Obr. 41 Čip CPV kontaktovaný technologií Aerosol Jet

### 3.2 Návrh a realizace kontaktování součástek pro nízkoteplotní substráty

Kontaktování součástek pro flexibilní nízkoteplotní substráty využívá možnosti tisku velmi jemných vodivých motivů a možnosti tisku na nerovné povrchy. Součástky se kontaktují tak, že jejich vývody jsou orientovány na horní stranu čipu (některé součástky, jako např. MLF pouzdra, se tedy kontaktují svou spodní stranou orientovanou vzhůru). Pro spolehlivý kontakt je nezbytné odstranit skokový výškový rozdíl mezi vývody SMT součástky a substrátem. Toho může být docíleno umístěním součástky přímo do dielektrika či cíleného nanesení dielektrického (nejčastěji UV tvrditelného) materiálu pomocí disperzeru k hranám součástky tak, že výškový rozdíl je ve výsledku spojitý a nikoliv skokový (Obr. 42).



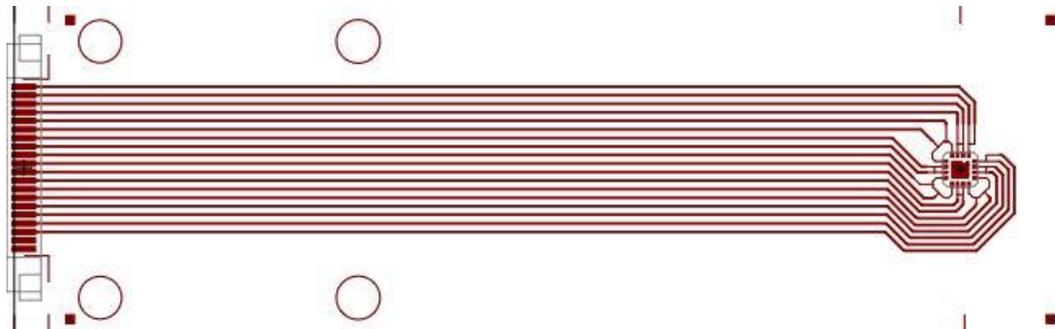
Obr. 42 Potřeba spojitého vyrovnání výškového rozdílu. A) tisk bez vyrovnání B) tisk s vyrovnáním

Výsledkem správného umístění a depozice dielektrika je, že čip je umístěn tak, že jeho horní strana plynule navazuje na dielektrikum. Zvláště při umísťování součástky do dielektrika je (pokud to velikost čipu umožňuje) žádoucí chránit horní stranu čipu s vývody zamaskováním před případnou kontaminací vývodů dielektrickým materiálem.

#### 3.2.1 Testovací motiv a součástky

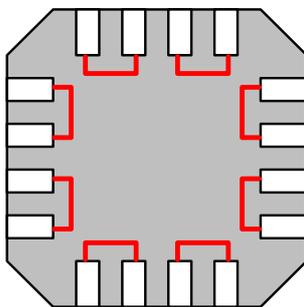
Byl vytvořen měřicí motiv pro osazení a testování kontaktování MLF součástek (Obr. 43). Tento motiv byl vyroben pomocí sítotisku ze stříbrné vodivé pasty. Substrát testovacího motivu byla PET fólie. Motiv má vyvedené kontakty pro měření čtyřvodičovou metodou a rozvržení kontaktů umožňuje měření zasunutím do měřicího přípravku s připojeným měřícím přístrojem. Motiv je vhodný nejen pro testy kontaktování tiskovou technologií, ale i pro testy konvenčního kontaktování pomocí pájení či kontaktování vodivými

a nevodivými lepidly. Zároveň délka motivu umožňuje snadné upnutí a provádění statických či dynamických ohybových testů.



Obr. 43 Testovací motiv pro osazování MLF součástek

Jako testovací součástky pro kontaktování byla vybrána pouzdra typu MLF (také známé jako QFN nebo MLP). Pro testování kontaktního odporu je nevhodné, aby součástka měla uvnitř vytvořené funkční obvody a bloky, proto byly pro experimenty vybrány testovací makety součástek (tzv. dummy components). Tyto makety jsou vyrobené ze stejného materiálu jako běžné součástky včetně jejich vývodů, jen neobsahují žádné vnitřní logické obvody a vývody jsou uvnitř propojeny (Obr. 44). Takovéto makety nacházejí využití pro testování osazovacích linek (opakovatelnost umístění) a právě pro měření kontaktních odporů. Byly vybrány součástky od firmy Practical Components s označením A-MLF16-4-.65. Jednalo se o součástky s 16 vývody (4 na každé straně), velikosti 4x4 mm a s roztečí vývodů 0,65 mm.



Obr. 44 Schématický model vnitřního propojení vývodů testovací makety

### 3.2.2 Tiskové materiály

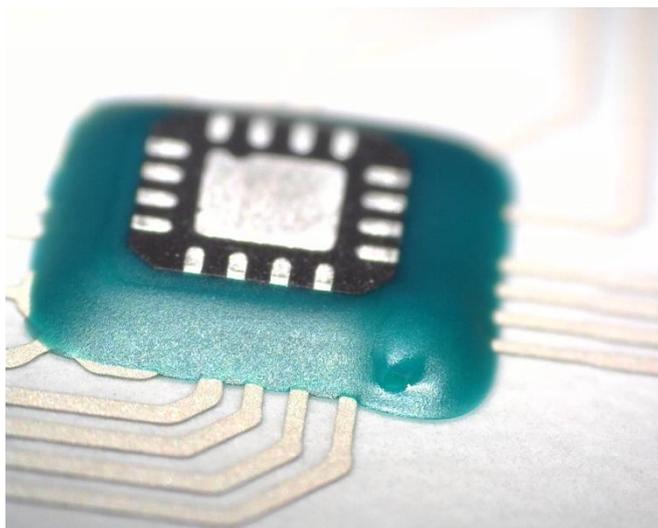
Jako vhodná dielektrika byly na doporučení výrobců vybrány různé materiály na bázi UV tvrditelných akrylátů. UV tvrditelné materiály s vyšší viskozitou umožňují snadné nanášení pomocí dávkování dutou i plnou jehlou a relativně dobrou tvarovou stálost i při silnější vrstvě před vytvrzením. Samotné vytvrzení probíhá osvitom v UV spektru což kromě vysoké rychlosti vytvrzení (v řádu několika sekund) přináší i výhodu podstatně menší tepelné zátěže substrátu a součástky než pro dielektrika vytvrzovaná teplem (sušením např. v laboratorní sušičce). Byly testovány UV tvrditelné materiály CSP-5210, Henkel AA3924, Henkel AA3926 a Smart Fabric Inks UV-D1.

Pro realizaci vodivých propojení byl zvolen inkoust výrobce XTPL na bázi nanočástic stříbra, který umožňuje vytvrzení do teploty 140 °C (teplotní omezení PET substrátu). Tyto typy stříbrných vodivých inkoustů patří k nejběžnějším a relativně cenově dostupným materiálům pro tisk pomocí nanášení aerosolu.

### 3.2.3 Příprava vzorků

Prvním krokem bylo osazení a zafixování MLF pouzdra na připravené místo na substrátu. Fixace byla prováděna pomocí kapky sekundového lepidla. Dalším krokem bylo vytvoření motivu a dávkování dielektrika pomocí robotického trojosého dispenzeru Nordson EFD Pro Plus 4. Dielektrikum bylo dávkováno v jedné vrstvě a vytvrzeno UV zářením. Výsledek tohoto procesu je na

Obr. 45.

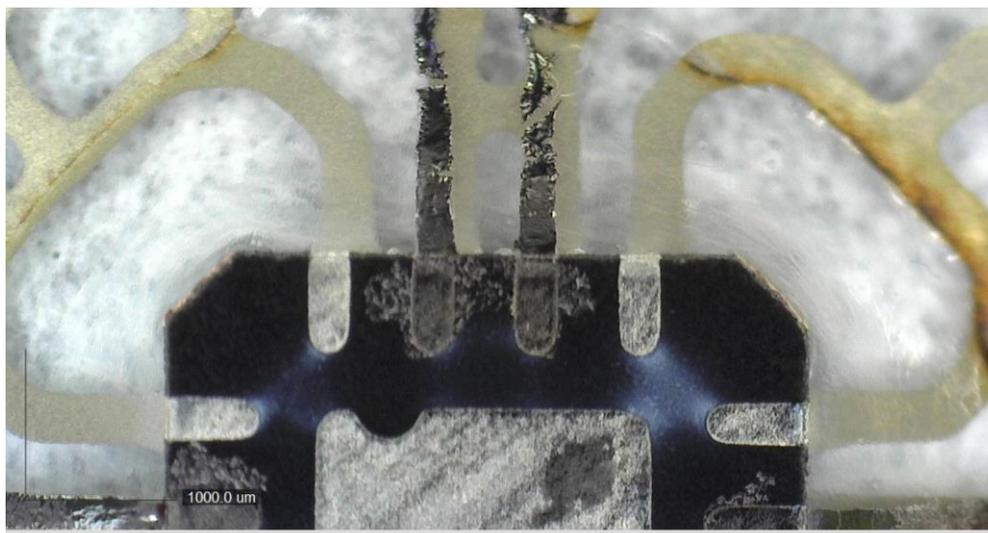


Obr. 45 MLF pouzdro s dielektrickým můstkem z materiálu CSP-5210 naneseným pomocí dávkování

Následujícím krokem byl návrh motivu v CAD prostředí a následný tisk kontaktů technologií Aerosol Jet.

### 3.2.4 Vyhodnocení

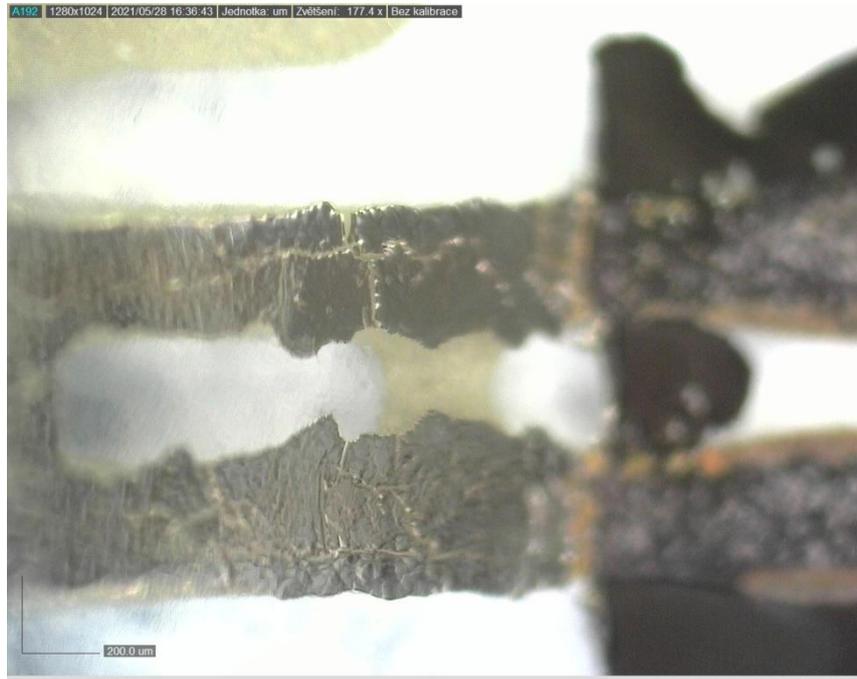
Fáze osazení čipu a dávkování dielektrika proběhla bez větších problémů. První problém se vyskytl při vytvrzování silné vrstvy dielektrika CSP-5210 naneseného robotickým disperzerem. Dielektrikum při osvětlení nepropouští (kvůli své pigmentaci) UV paprsky do větší hloubky a vytvrzení v takto silné vrstvě je tedy velmi nedokonalé. Vytvrzený je pouze povrch dielektrika ovšem do větší hloubky již UV záření proniká velmi obtížně a pro dokonalé vytvrzení je nutné použít vysokou intenzitu záření a velmi dlouhý čas, čímž se vytrácí jedna z velkých obecných výhod UV tvrditelných materiálů, rychlost vytvrzení. Oproti tomu dielektrika Henkel AA3924 a AA3926 jsou čirá a jejich vytvrzení i v silné vrstvě vyžaduje dobu osvětlení v řádu jednotek až desítek sekund. Další problém se vyskytl při samotném tisku vodivých propojení. Vytvrzená použitá UV tvrditelná dielektrika vodivý inkoust smáčí nedostatečně. Plasmatickou úpravou jejich povrchu se smáčivost znatelně zlepšila, ovšem i tak ji lze označit během tisku za velmi špatnou a po vytvrzení vzorků v laboratorní sušičce opět za nedostatečnou (Obr. 46). Naopak se silnou plasmatickou úpravou značně zvýší smáčivost samotného čipu, což vede k takové míře smáčivosti, že natištěné linie se na sousedních ploškách propojují, což je velmi nežádoucí jev. Jako dielektrikum vhodné pro potisk i bez plasmatické úpravy se jevil materiál Smart Fabric Inks – UV-D1. Tento materiál již výrobce bohužel nedodává.



Obr. 46 Defekty tištěných kontaktů na dielektrickém materiálu

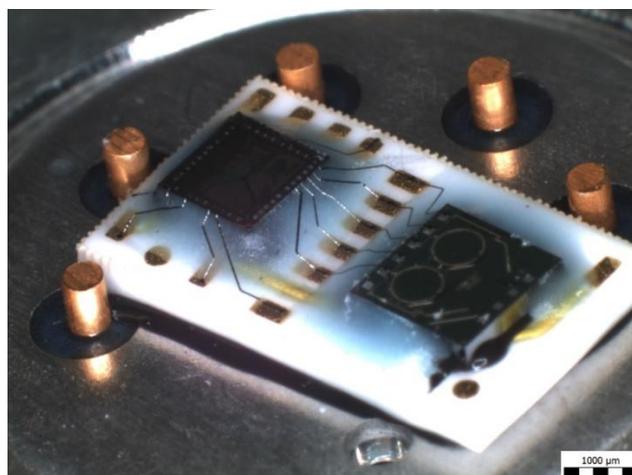
Dalším problémem při kontaktování čipů na nízkoteplotní substráty je jejich rozdílná teplotní roztažnost oproti použitým dielektrickým materiálům. Po vytvrzení byly často

zformovány praskliny (Obr. 47) nejen na vodivém inkoustu ale i mezi dielektrikem a substrátem které samozřejmě negativně ovlivňují vodivost spojení.



**Obr. 47 Detail defektů na tištěných kontaktech**

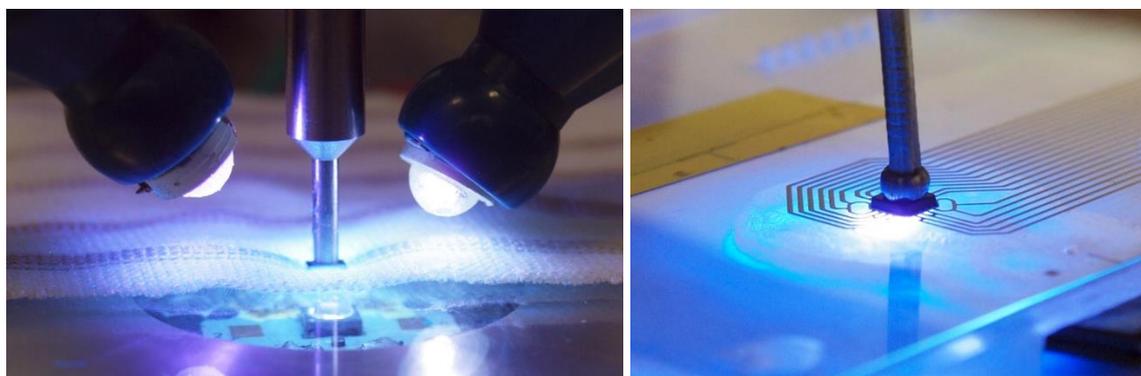
Tento jev byl pozorován u PET i polyamidových substrátů, nebyl pozorován u keramických substrátů. Problémem u menších součástek s větším počtem a hustotou vývodů jsou také velmi vysoké nároky na přesnost osazení a pracnost následného vytváření kontaktů. Čipy na Obr. 48 byly osazovány ručně zadavatelskou firmou a pro každé propojení dvou čipů na substrátu bylo tedy nutné z důvodu nepřesného osazení a různému pootočení čipů vůči sobě i vůči substrátu připravit nový CAD soubor s motivem tisku dle mikroskopické inspekce.



**Obr. 48 SMD čipy s naneseným dielektrikem a tištěnými propojeními pomocí tisku aerosolu**

Jedinou vhodnou kombinací se tak jevílo kontaktování rozměrově větších součástek s využitím nanočásticového inkoustu na vodní bázi Clariant Prelect TPS50 s dielektrikem Smart Fabric Inks UV-D1 na keramickém substrátu (tj. hlavně pro účely výkonové elektroniky viz kapitola 3.1.2). Z výše zmíněných problémů je patrné, že nalezení vhodné kombinace dielektrického materiálu, inkoustu a flexibilního substrátu je velmi náročné a vyžaduje velkou řadu relativně drahých materiálů (zvláště inkoustů vhodných pro Aerosol Jet) pro testy vzájemné kompatibility.

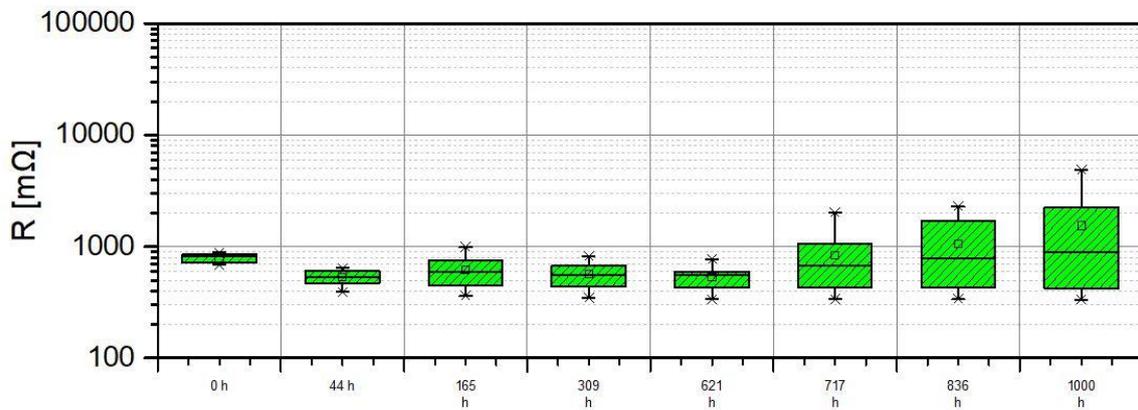
Vysoké nároky na přesnost osazení a velká pracnost vytváření takového propojení vedly k myšlence vytvoření zcela nové technologie kontaktování součástek pro flexibilní a nízkoteplotní substráty bez použití tisku vodivých inkoustů. Princip kontaktování spočívá v dávkování UV tvrditelného lepidla (Loctite AA3926 či Loctite AA3924) na místo s kontaktními ploškami pro součástku na substrátu, osazení součástky do nevytvrzeného lepidla a její silné přitlačení na místo. Přítlak vytlačí lepidlo z mezery mezi vývody na substrátu a vývody na součástce, které se fyzicky začnou dotýkat a během přítlaku je započato vytvrzování UV zářením (Obr. 49). Během procesu vytvrzování (maximálně desítky sekund) je udržován stálý přítlak na součástce. Tímto způsobem lze velmi snadno a rychle vytvářet kvalitní kontakty.



**Obr. 49** Kontaktování SMT součástky nevodivým lepidlem na vodivý textilní substrát (vlevo) a kontaktování MLF makety na testovací motiv (vpravo)

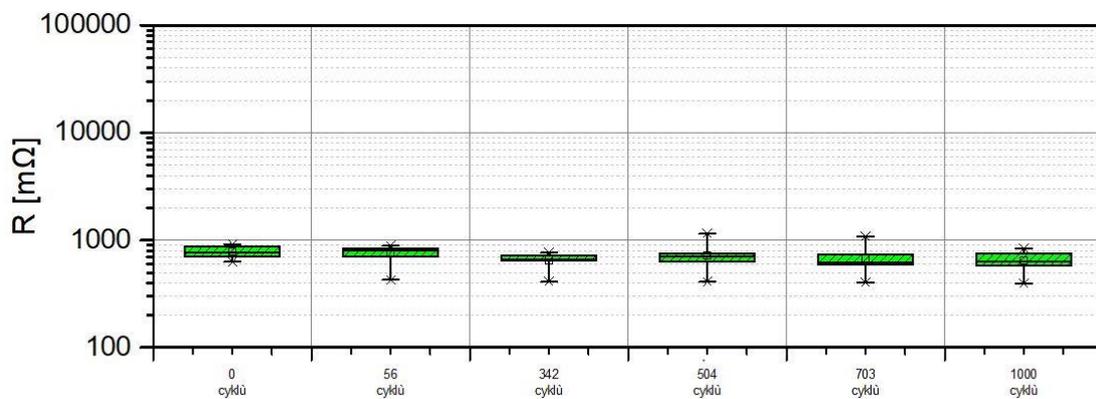
Mezi výhody patří vysoká rychlost vytvoření kontaktu, spolehlivost, nižší nároky na přesnost osazení, nízká tepelná zátěž a nízká cena. Další obrovskou výhodou je, že takto lze kontaktovat součástky nejen na flexibilní nízkoteplotní substráty v podobě folií či papíru, ale lze takto velmi úspěšně kontaktovat i součástky přímo na vodivé textilní substráty (smart textilie). Pro tento koncept byla navržena a zkonstruována osazovací stanice. Spoje vytvářené touto technologií byly podrobeny velké řadě testů na foliových

substrátech (statické a dynamické ohýbací testy, testy zrychleného stárnutí suchým teplem, vlhkým teplem, šokové teplotní testy, testy proudovým zatížením, testy v korozivní atmosféře) a pro textilní substráty navíc testům prateľnosti, mechanického natahování a trhání či dlouhodobému vystavení syntetickému potu. Tyto testy byly porovnávané (pokud to bylo možné) se součástkami kontaktovanými pomocí pájení a pomocí vodivých lepidel a téměř vždy dosahovaly stejných či v některých případech lepších parametrů, než ostatní vzorky. Na Obr. 50 je zobrazeno měření a distribuce hodnot kontaktních odporů MLF pouzdra pro šokový test zrychleného stárnutí (1000 cyklů, v jednom cyklu 8 minut při -20 °C a 8 minut při 85 °C). Vzorky byly měřeny čtyřbodově multimetrem Keithley 2701.



Obr. 50 Závislost kontaktních odporů na testu šokovým stárnutím

Dále proběhly také testy zrychleného stárnutí suchým teplem (85 °C, 1000 h), výsledky lze vidět na Obr. 51.



Obr. 51 Závislost kontaktních odporů na testu zrychleného stárnutí suchým teplem

Původní koncept přetisku dielektrika vodivým inkoustem je tedy vhodný pouze pro vybrané materiály a aplikace. Naopak technologie kontaktování nevodivým lepidlem je výhodnější pro sensorové prvky, osvětlení, nositelnou elektroniku, smart textilie apod. Z výsledků je patrné, že kontaktní odpor takto vytvořeného spoje je poměrně stabilní a jeho hodnoty odporu se pohybují pod  $1 \Omega$  na 2 kontakty. Obrovskou výhodou takto vytvořených spojů je, jak je výše zmíněno, právě možnost kontaktovat součástky přímo k vodivým textilním substrátům a odpor tohoto spoje je plně dostačující pro kontaktování LED diod, které jsou pro smart textilie zdaleka nejvíce osazovaným prvkem (např. smart textilie pro aktivní bezpečnost cyklistů či běžců viz Obr. 52).



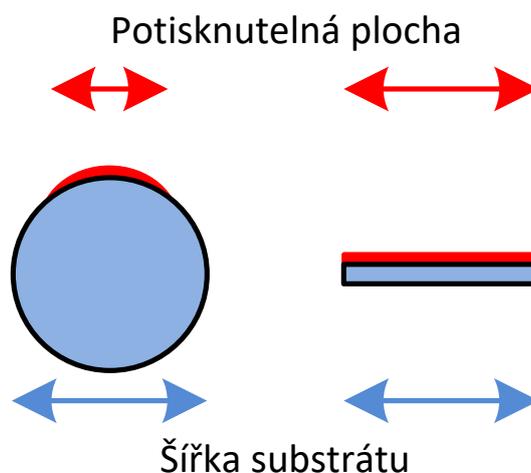
**Obr. 52** Cyklistický dres s LED ukazatelem směru odbočování (LED diody kontaktované nevodivým lepením na pružné vodivé textilní stuže všité do dresu)

## 4 Plně tištěné senzorové elementy

Technologie tisku pomocí aerosolu umožňuje vytváření vodivých součástkových struktur s vysokým rozlišením na standardní rigidní (např. keramika, skloepoxidový laminát, sklo) i nízkoteplotní ohebné substráty (např. PET, PEN, PI fólie, papír). Systém je využíván hlavně pro přípravu senzorových struktur, a to jak jejich elektrodového systému, tak aktivní vrstvy. Výhodou takto připravených senzorů oproti senzorům konvenčním je jejich malá velikost, ohebnost, větší planárnost a v neposlední řadě nízká hmotnost. V kombinaci s organickými materiály či biologicky rozložitelnými substráty může být jejich výhodou také nízká zátěž životního prostředí nejen při výrobním procesu (efektivní využívání materiálu), ale také po skončení jejich životnosti v rámci jejich likvidace. Obzvláště nízká hmotnost může být pro některé aplikace obrovskou výhodou. V rámci výzkumu a vývoje se lze setkat např. se senzorovými jednotkami vyvíjenými pro hasiče, které jsou umístované v kapsli kolem rizikového požářiště pomocí dronu. Nosnost takového dronu je omezená a díky využití tiskových technologií jako je tisk aerosolu mohou být tyto senzorové jednotky lehčí a menší. Zmenšením velikosti a snížením hmotnosti senzorové jednotky lze využít dvěma způsoby – první z nich je, že dron takových jednotek může umísťovat násobně více. Druhý způsob je, že takto využívané drony mohou být podstatně menší a levnější než v současnosti a i tak dovedou rozmístit adekvátní počet senzorů. V obou případech vývoj těchto systémů pomůže zlepšit informovanost a bezpečnost jednotky hasičů a následně i obyvatel v okolí požáru.

## 4.1 Senzorový element použitelný na vlákenných strukturách

Technologie pro výrobu plně tištěných senzorů dnes dospěly do stavu, že je možné vytvářet senzorové elementy i na velmi nepřístupných místech či právě ve formě tenkých vláken. Tyto senzory mohou být nejen součástí moderní elektroniky v podobě inteligentních textilií, ale také mohou podstatným způsobem změnit tvar, velikost a celkové prostorové uspořádání senzorové (či multisenzorové) jednotky. Dle předchozích experimentů [60] se pro tisk příliš nehodí klasická vlákna kulatého průřezu. Je u nich totiž velmi obtížné (kvůli oválnosti) využít jejich plnou plochu k tisku (Obr. 53).

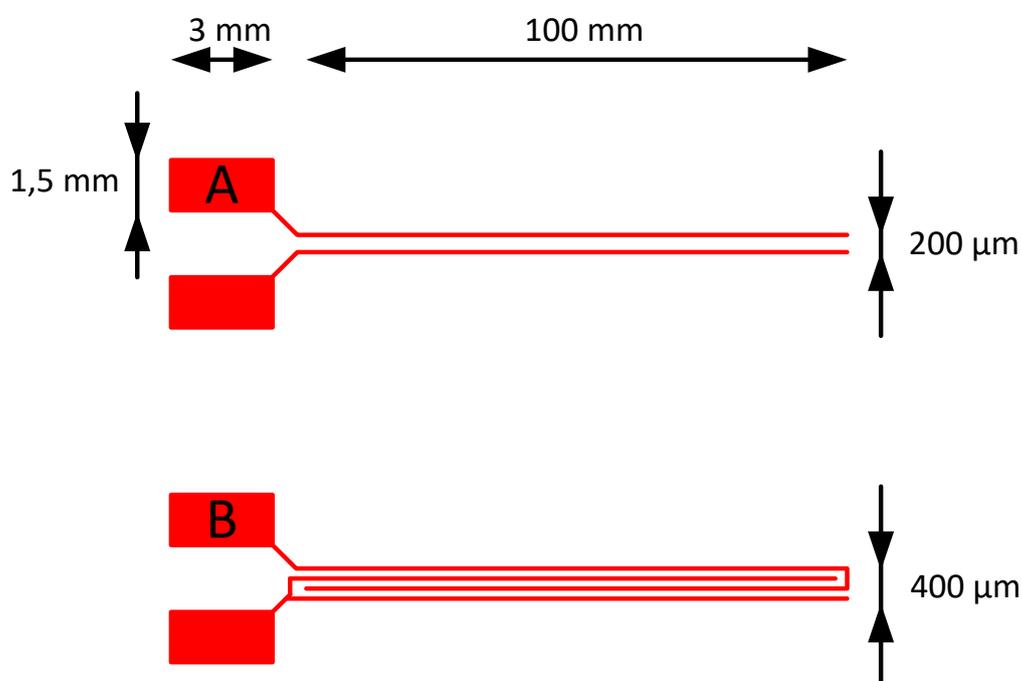


Obr. 53 Potisknutelná plocha pro klasická vlákna (vlevo) a ploché vlákenné struktury (vpravo)

Dalším problémem je samotné upnutí vlákna během tisku a celkově obtížná manipulace. Oproti tomu pro planární vlákenné struktury (tenké pásky ohebné fólie) je možné využít 100 % plochy k tisku a manipulace s nimi je podstatně jednodušší. Při výrobě takovýchto senzorů je optimálním postupem kompletní tisk a případné vytvrzení senzorového elementu a až finálně jsou jednotlivé senzory vyřezány z fólie ve formě vlákenných struktur (laserem či řezacím zařízením). Tento postup velmi výrazně usnadní manipulaci a kontrolu během tisku a následného zpracování. Senzory lze vytvářet na obou stranách vlákenné struktury a byla ověřena i možnost kontaktování takovýchto oboustranných prvků. [53] Vlákenné struktury se senzory mohou najít svoji aplikaci v měření parametrů v místech s nesnadným přístupem (otvory, štěrby) či mohou posloužit jako teplotní senzory vložené přímo do kompozitního materiálu a monitorovat rozložení teplot v dílu během jeho výroby (tepebného a tlakového vytvrzování).

### 4.1.1 Topologie senzorů

V rámci experimentů byly navrženy 2 různé topologie senzorů (Obr. 54) pro tisk zařízením Aerosol Jet. Tyto topologie vycházejí ze struktury interdigitálních elektrod, kterou prodlužují do formy dlouhého vlákenného senzoru. I když byla v prvopočátcích zkoušena varianta s vývody na obou stranách senzoru, v rámci jednoduššího kontaktování, prostorového uspořádání při měření a případné budoucí aplikace senzoru byly dále vytvářeny jen typy s vývody na jedné straně. Funkčně nemá tato změna na chování senzoru vliv, a pokud by to bylo nezbytné, je možné kontaktní plošky pro konkrétní aplikace individuálně přizpůsobit jejich upraveným umístěním, tvarem či velikostí.



Obr. 54 Návrhy topologie senzorů

### 4.1.2 Příprava vzorků

Jako substrát pro vzorky byla zvolena polyimidová fólie DuPont Kapton HN500 o tloušťce 127 μm. Tento ohebný substrát disponuje dobrými elektrickými vlastnostmi, vysokou teplotní a chemickou odolností a tvarovou stálostí. Protože je nutné tisknout poměrně jemné motivy, byl pro tisk zvolen jako nejvhodnější ultrazvukový atomizér (viz kapitola 0). Inkoustem pro tisk kolineárních interdigitálních elektrod byl stříbrný nanočásticový

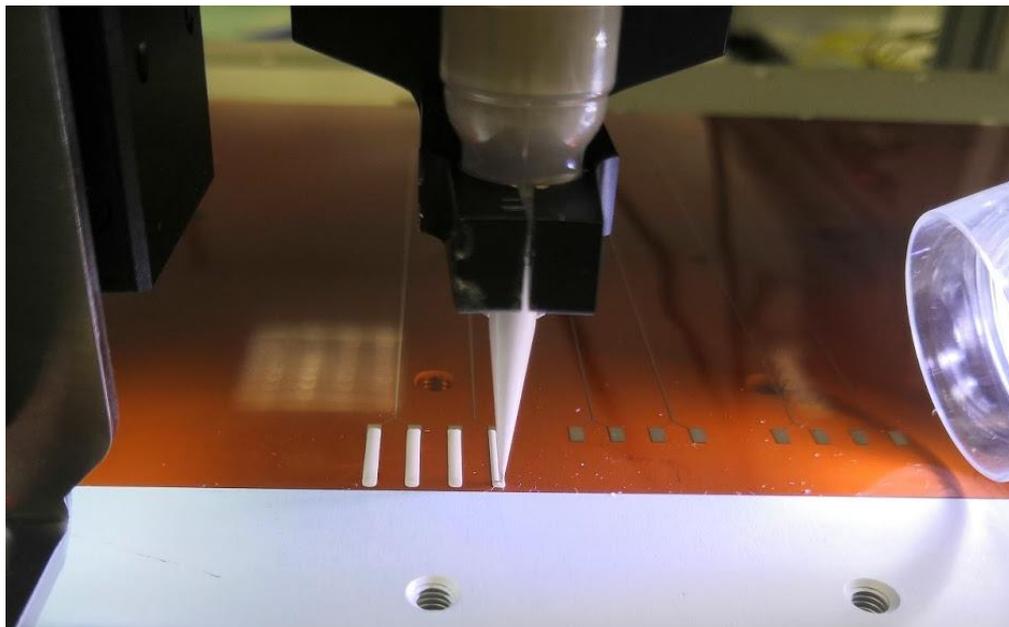
inkoust XTPL CL34. Tento inkoust je svou viskozitou (200 až 400 mPa·s) primárně určený pro pneumatický atomizér, ale po jednání s firmou XTPL byl na naši žádost v rámci testování vzorek upraven na viskozitu použitelnou i v ultrazvukovém atomizéru (1-5 mPa·s). Substrát pro tisk byl umístěn do tiskového zařízení a těsně před tiskem elektrod byl plasmaticky upraven nízkoteplotním plasmatem zařízením Relyon Plasma PB3, které bylo integrováno do systému Aerosol Jet. Integrace přímo v tiskovém zařízení eliminuje manipulaci se substrátem po plasmatické aktivaci a velmi výrazně tak snižuje pravděpodobnost kontaminace substrátu mechanickými nečistotami z prostředí. Jako aktivní vrstva senzoru byl zvolen inkoust na bázi uhlíkových nanostruktur – redukováného oxidu grafenu. Tato disperze byla vytvořena smísením grafenového prášku od firmy Graphenea (medián velikosti částic v prášku je 4-6  $\mu\text{m}$ ) s rozpouštědlem DMAC v poměru 1 mg prášku na 1ml rozpouštědla. Tato směs byla sonifikována v ultrazvukové lázni o výkonu 400W po dobu 12 hodin. Poté byla centrifugována na 10 000 otáček za minutu po dobu 45 minut.

Elektrody byly tištěny technologií Aerosol Jet s nastavením, uvedeným v Tabulka 7. Tisk jednoho vzorku trval přibližně 3 minuty, kdy velkou část času zabral tisk kontaktních plošek. Ty byly právě z důvodu úspory času po prvním vzorku optimalizovány (zmenšeny).

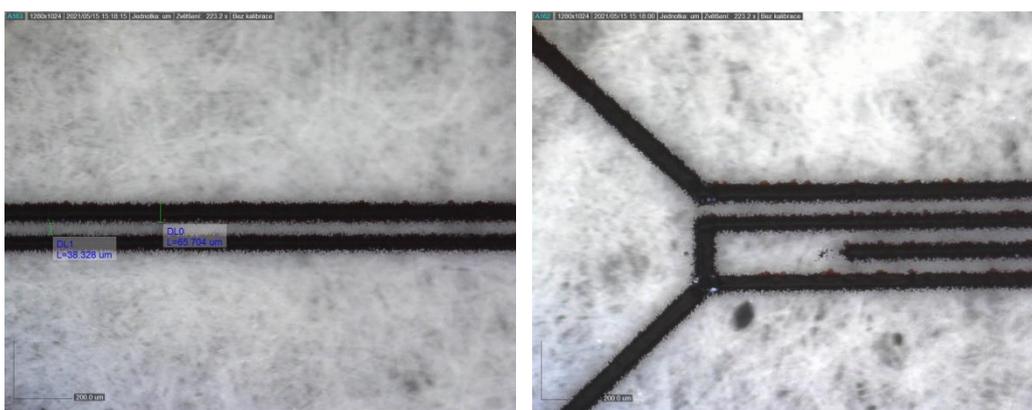
**Tabulka 7 Nastavení tisku**

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>Průměr trysky</b>                   | 250 $\mu\text{m}$ |
| <b>Nosný plyn</b>                      | 40 sccm           |
| <b>Zaostřovací plyn</b>                | 100 sccm          |
| <b>Buzení ultrazvukového atomizéru</b> | 450 mA            |
| <b>Rychlost tisku</b>                  | 3 mm/s            |

Výsledný tisk - detail vzorků A a B je na Obr. 56. Bylo připraveno 10 vzorků od každého typu vláknových senzorů. Po tisku byly vzorky vytvrzeny v laboratorní sušičce nastavené na 200 °C po dobu 30 minut. Pro snazší kontaktování pro testy v klimatické komoře byly pomocí robotického dispenzeru (dávkování dutou jehlou, Obr. 55) kontaktní plošky prodlouženy a vytvořeny z podstatně silnější vrstvy vodivého materiálu. Dotisknuté pomocné kontakty byly vytvrzeny v laboratorní sušičce.



Obr. 55 Dotisk pomocných kontaktů pomocí dávkování dutou jehlou

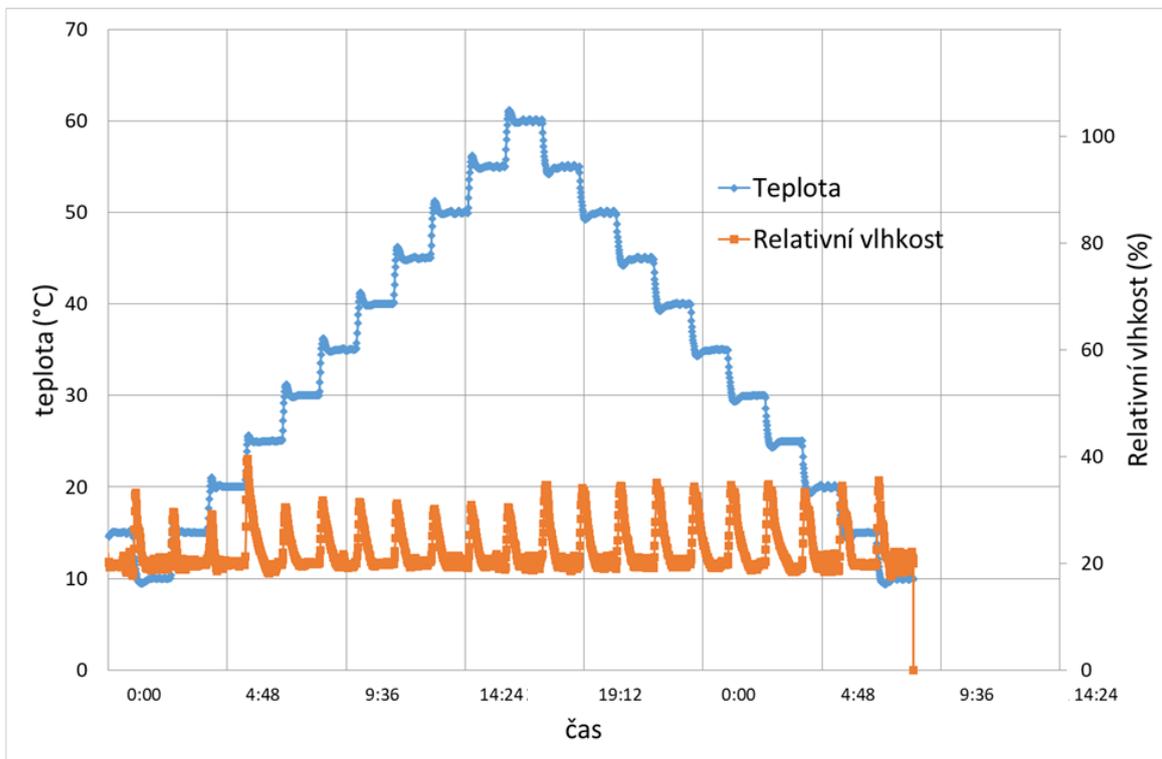


Obr. 56 Detail natisknutých elektrod vzorku A (vlevo) a vzorku B (vpravo)

Následně byl na elektrodový systém deponován inkoust s redukováným oxidem grafenu. Pro depozici byla využita technologie airbrush, která využívá stlačeného vzduchu pro nanášení velmi tenkých vrstev tekutých materiálů. Dle předchozích experimentů s obdobnými inkousty (s tím rozdílem, že v práci byly použity inkousty na bázi uhlíkových nanotrubic nikoliv grafenu) [61] byla nastavena vzdálenost mezi tryškou a substrátem 10 cm. Zasušení inkoustu probíhalo přímo při tisku na laboratorní plotýnce vyhřívané na teplotu 110 °C.

### 4.1.3 Měření

Senzory byly nakontaktovány měřicími svorkami a připojeny k multimetru Keithley 2701 s multiplexovou měřicí kartou, který byl nastaven pro dvou vodičové měření odporu jednotlivých kanálů. Vzorčky byly umístěny do klimatické komory a byl nastaven teplotní profil 10 – 60 °C s krokem 5 °C (Obr. 57).

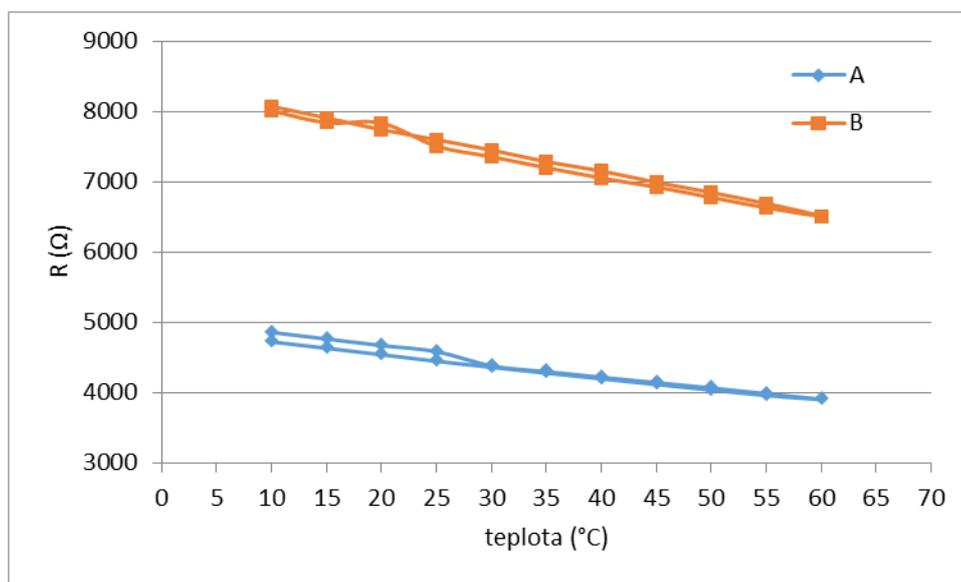


Obr. 57 Teplotní a vlhkostní profil klimakomory, opakován 3x

Tento nastavený teplotní profil byl měřen třikrát po sobě. Během měření by bylo žádoucí zachovávat nulovou relativní vlhkost po celou dobu měření. Reálně ale použité klimatické komory nedovedou nulovou hladinu vlhkosti udržovat, byla proto nastavena hladina co nejnižší, tj. 20% RH. Dále bylo nutné nastavit vhodný časový úsek, po který budou senzory vystaveny vždy jedné hladině teploty. První důvod je teplotní stabilizace měřených vzorků, druhý důvod i zmíněná relativní vlhkost. Při zvýšení teploty v klimakomoře začne s teplotou růst i relativní vlhkost a její opětovné snížení a ustálení na nové teplotní hladině zabere nějaký čas. Z těchto důvodů byl zvolen čas 90 minut na každé teplotní hladině.

Zprůměrované hodnoty měření závislosti na teplotě pěti sensorů A a čtyř sensorů B jsou na Obr. 58. Z grafu je patrné, že křivky vynesené při růstu a poklesu teploty se téměř

překrývají, což značí nízkou mírou hystereze. Při nárůstu a následném poklesu teploty se senzor s vysokou mírou hystereze výrazněji liší ve svých reakcích na jednu konkrétní teplotu a křivky by se v tomto případě výrazně nepřekrývaly. Z grafu je také zřetelný velmi podobný charakter obou typů vzorků A a B, vzorky B mají průměrný odpor přibližně o 60% větší než vzorky A, což je způsobeno topologií vzorku B (dvojitá interdigitální struktura oproti vzorku A). Sensory mají NTC charakter (odpor s teplotou klesá), což potvrzuje i záporný TCR koeficient. Průměr TCR a medián hystereze (v % z měřené hodnoty odporu) pro vzorky A a B je v Tabulka 8.



Obr. 58 Závislost odporu senzorů na teplotě

Tabulka 8 Parametry senzorů

| Parametry                      | Vzorky A | Vzorky B |
|--------------------------------|----------|----------|
| Medián hystereze (%)           | 3,0      | 10,2     |
| Průměr TCR ( $10^{-3}K^{-1}$ ) | -3,77    | -3,45    |

#### 4.1.4 Vyhodnocení

V rámci experimentu byla úspěšně ověřena možnost vytvářet funkční vláknové senzory teploty pomocí technologie tisku aerosolu. Výhodou takto vytvořených senzorů je jejich snadné umístění i do velmi nepřístupných prostor, možnost jejich integrace v rámci smart textilií či nositelné elektroniky a v neposlední řadě jejich možnost umísťování do kompozitních materiálů a monitorování jejich teploty během vytvrzení. Tyto senzory mohou být vytvářeny na rozličných materiálech substrátů. Senzory mohou být tedy vytvořeny přímo na vlákně struktuře, ze které je kompozit složen (např. uhlíková vlákna), vloženy do kompozitu a po vytvrzení se stát trvalou (i když po vytvrzení již nepotřebnou) součástí výrobku. Obrovskou výhodou je to, že senzory jsou takto vytvořené na stejném materiálu substrátu, ze kterého je složen i celý kompozit a tudíž téměř neovlivňují jeho mechanické vlastnosti. Právě možnost integrace takového senzoru do kompozitních uhlíkových materiálů bude dále zkoumána v rámci soutěže Formula Student při výrobě a vývoji kompozitních konstrukčních a aerodynamických prvků.

## 4.2 Elektrodové systémy pro senzorické aplikace

Jak bylo zmíněno v kapitole 4, technologie tisku mohou sensorový element výrazně zmenšit, snížit jeho hmotnost či méně zatěžovat životní prostředí. Planarita plně tištěných senzorů přináší řadu technologických výhod jako je například ohebnost či menší velikost. Planarita senzoru ovšem nepřináší sama o sobě výhody z hlediska jejich statických či dynamických parametrů. Další výhodou tiskových technologií a zvláště pak tisku aerosolu jsou obrovské možnosti tisku úpravy topologií či tisku nových materiálů na již ověřené elektrodové systémy či jejich výrazná miniaturizace. Oproti síťotiskové technologii zde není nutné při každé změně velikosti či tvaru vytvářet kompletní nová síta či šablony, ale změny je možné provést velmi rychle pomocí návrhu motivu v CAD počítačovém programu. Oproti inkoustovému tisku nabízí depozice aerosolu vyšší rozlišení a snadný tisk na nerovné substráty. Z těchto důvodů je zařízení velmi vhodné pro tzv. rapid prototyping.

### 4.2.1 Senzor oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>)

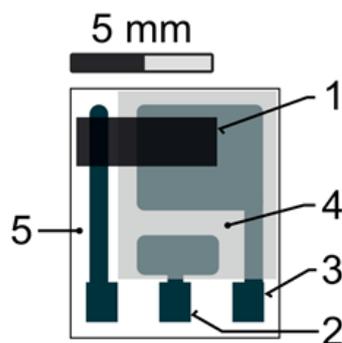
Oxid dusičitý je agresivní, vysoce reaktivní toxický plyn těžší než vzduch. Vyskytuje se v prostředí hlavně jako důsledek spalování fosilních paliv či biomasy. Plyn způsobuje dýchací potíže a byl studiem také označen jako karcinogenní. Další efekty, které tento plyn v prostředí způsobuje, jsou kyselá deště či podíl na tvorbě smogu a přízemního ozonu. [62][63] Elektrochemické senzory obecně vynikají svou vysokou citlivostí, dobrou selektivitou, krátkými časy odezvy a zotavení a přijatelnou dlouhodobou stabilitou. Integrovat konvenční senzory (Obr. 59) do moderní sensorové jednotky s sebou ale nese určitá rizika – v konvenčních senzorech se zpravidla využívá tekutý/gelový elektrolyt na bázi kyselin, jehož uvolnění může mít za následek nejen nefunkčnost senzoru ale i poškození ostatních součástí či celého modulu. Další nevýhodou je velikost a někdy hmotnost celého senzoru. Vývoj v této oblasti v současnosti směřuje k využívání nových materiálů a technologií s cílem připravit levný, miniaturní senzor oxidu dusičitého.



Obr. 59 Konvenční senzor NO<sub>2</sub>; převzato a upraveno z [64]

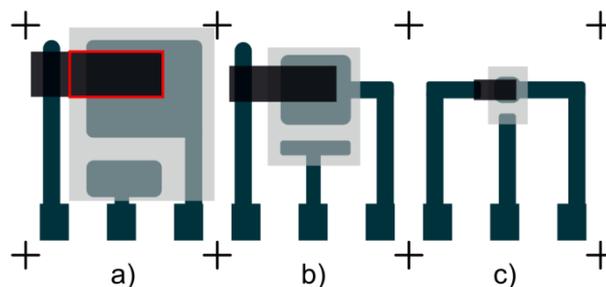
#### 4.2.1.1 Topologie senzoru

Jde o planární elektrochemický senzor, který se skládá z pracovní (WE), pomocné (CE) a pseudoreferenční (RE) elektrody umístěné na keramickém substrátu a vrstvy polymerního elektrolytu (Obr. 60). Senzor funguje na principu oxidačně redukčních dějů a na analyt reaguje změnou protékajícího proudu při konstantním napětí. Iontové kapaliny patří mezi perspektivní skupinu látek pro elektrochemické senzory předurčující vlastnosti z hlediska nehořlavosti, vysoké teplotní a elektrochemické stability elektrolytu. Mohou být použity jak ve formě kapalné [65] tak i ve formě pevného polymerního elektrolytu [66][67]. V přípravě vzorků v práci byl použit polymerní elektrolyt obsahující právě iontovou kapalinu. Princip přípravy tohoto materiálu byl popsán již v minulosti [44].



Obr. 60 Topologie senzoru (1 - uhlíková pracovní elektroda, 2 - pseudoreferenční elektroda, 3 - pomocná elektroda, 4 - polymerní elektrolyt, 5 - substrát)

Oproti standardně [44][68] využívané velikosti plochy elektrody byly v následujícím experimentu navrženy dvě zmenšené verze plochy pod pracovní elektrodou (Obr. 61). Nutno podotknout, že kontaktní systém zůstal kvůli používání stejných kontaktovacích přípravků nezměněn, stejně tak velikost substrátu.

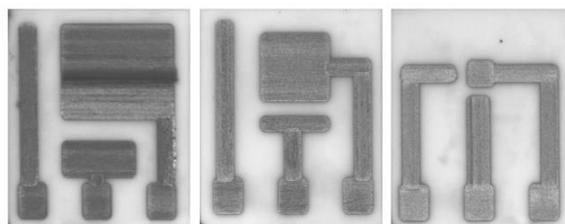


Obr. 61 Navržené miniaturizace senzoru – plocha pro pracovní elektrodu  
 a) standardní 8,5 mm<sup>2</sup> b) zmenšená 3 mm<sup>2</sup> c) zmenšená 0,8 mm<sup>2</sup>

#### 4.2.1.2 Příprava vzorků

Jako substrát byla použita keramická destička o rozměrech 7×9×1 mm. K přípravě elektrodového systému (pseudoreferenční a pomocné elektrody a svodu pracovní elektrody) byl použit nanočásticový platinový inkoust Fraunhofer IKTS Pt-LT-20. Polymerní elektrolyt (SPE) byl připraven smícháním látek od společnosti MERCK, konkrétně poly-(vinyliden fluorid) (PVDF, polymer), 1-ethyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethylsulfonyl)imid (iontová kapalina) a 1-methyl-2-pyrrolidon (NMP, rozpouštědlo) ve váhovém poměru 1:1:3, v uvedeném pořadí. Pracovní elektroda byla připravena ze směsi 600 g skelného uhlíku (Sigma Aldrich, sférické částice o velikosti 2-12 μm) ve 2 ml ethanolu.

Keramické substráty byly plasmaticky očištěny a aktivovány. Dále byly připraveny CAD podklady k tisku a následně pomocí nanočásticového platinového inkoustu byly technologií tisku aerosolu natištěny různé topologie elektrodového systému. Protože platinový nanočásticový inkoust patří k dražším inkoustům, je dodáván standardně v malém množství (5 ml). Pro tisk tak byl plně využit ultrazvukový atomizér, který dovoluje velmi malé vstupní množství materiálu (přibližně 1 ml). Substráty byly po dobu tisku vyhřívané na 60 °C. Po tisku následovalo zasušení tištěné platiny v laboratorní sušičce na teplotu 250 °C po dobu 60 minut. Výsledný tisk je na Obr. 62.

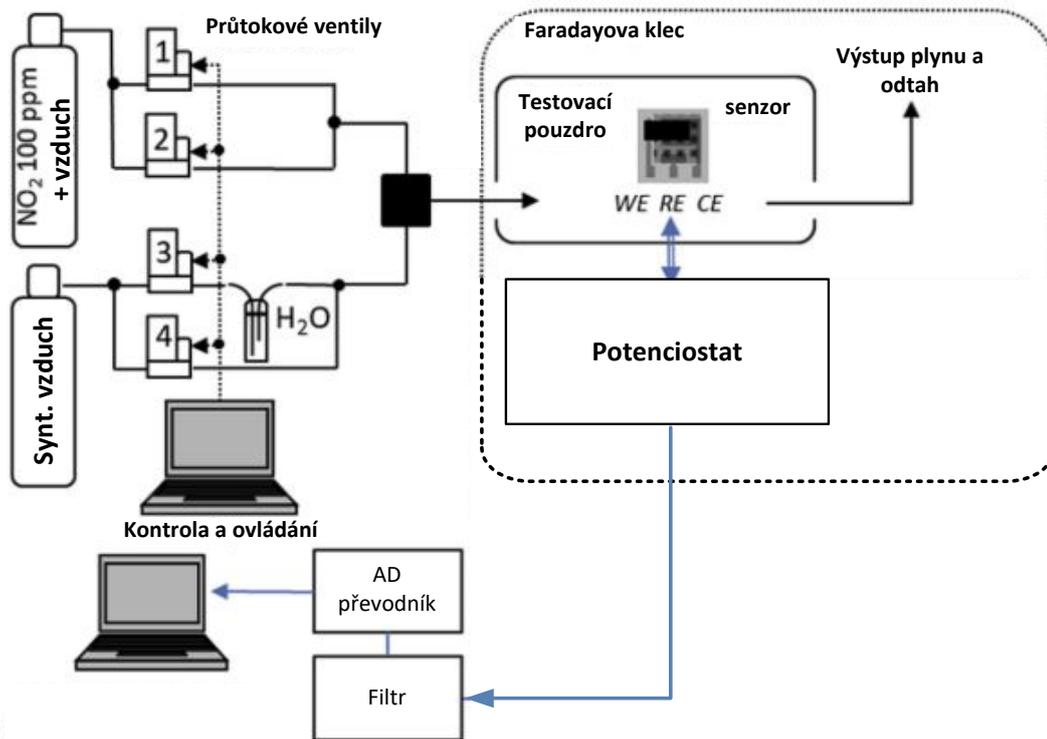


Obr. 62 Platinový elektrodový systém (všechny 3 velikosti) natištěný technologií Aerosol Jet

Na motiv bylo poté dávkováno dutou jehlou 15 mg tekutého materiálu SPE, a celý substrát byl umístěn na laboratorní plotýnku o teplotě 120 °C po dobu 3,5 minuty. Zde došlo ke krystalizaci a částečnému odpaření rozpouštědel a SPE byl po tomto procesu již ve formě pevné látky. Posledním krokem výroby bylo nanesení pracovní elektrody ze skelného uhlíku na vrstvu SPE. Ta byla nanášena technologií spray-coatingu přes plastovou šablonu.

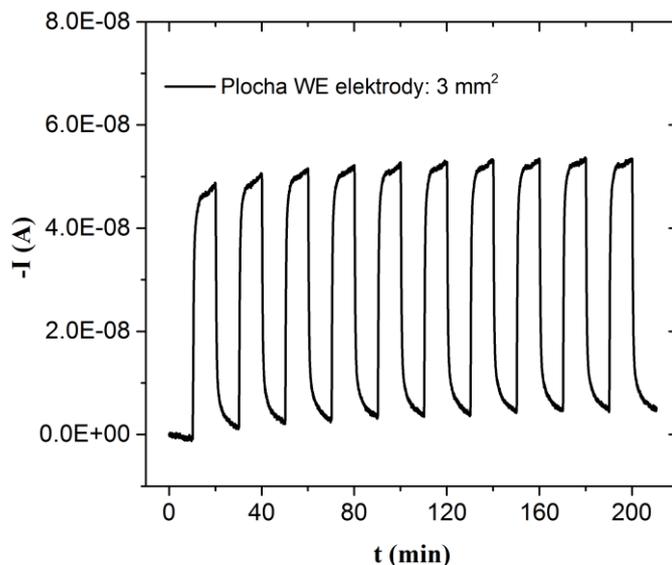
#### **4.2.1.3 Měření**

Pro testování byla použita měřicí stanice umožňující pomocí regulátorů průtoku přesně dávkovat množství a koncentrace plynu vstupujícího do testovací komory. Pro veškerá měření bylo udržováno předpětí pracovní elektrody na hodnotě -500 mV oproti pseudoreferenční Pt elektrodě. Hodnota tohoto napětí byla jako ideální určena v předcházejících experimentech. [44] Aby bylo dosaženo difuzního proudění plynu k pracovní elektrodě senzoru, byly senzory umístěny ve speciálním pouzdře s kapilárním otvorem (o průměru 500 µm), který byl překrytý kopolymerní membránou Versapor 10000R. Pro tříelektrodové potenciostatické zapojení senzoru byl použit analogový potenciostat (AFE) LMP91000, jehož výstupní signál byl následně digitalizován a zaznamenán počítačem. Schéma měřicího systému je Obr. 63. Bylo provedeno ampérometrické měření, tj. měření kdy je proudová odezva úměrná koncentraci měřeného plynu. Během měření byly udržovány stálé podmínky (22 °C, 40 % RH, normální tlak, průtok plynu 1 L/min).



Obr. 63 Měřicí systém pro senzory plynů; převzato a upraveno z [68]

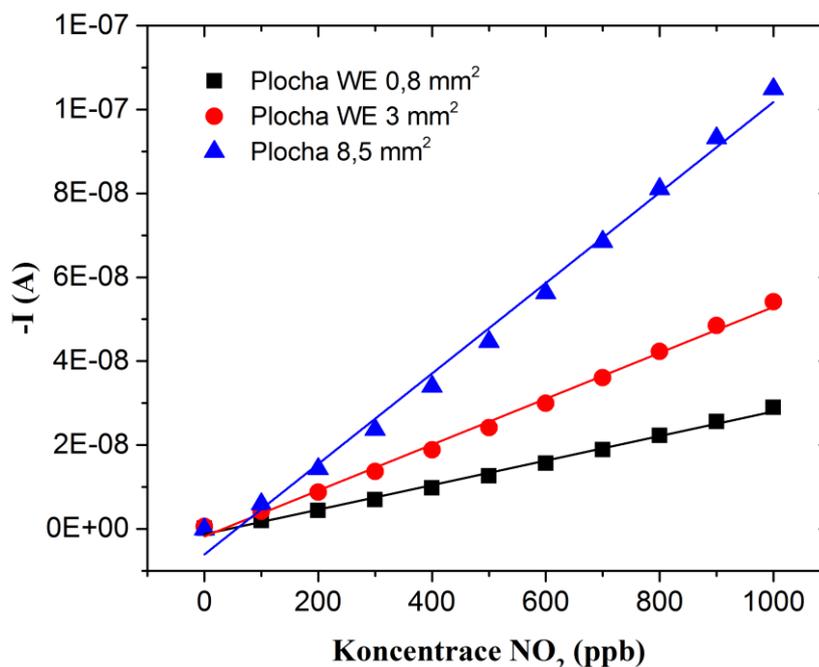
Senzory byly podrobeny dvěma typům testů. První z nich spočívá v opakovaném vystavení senzoru stejné koncentraci plynu (zde  $10 \times 1 \text{ ppm NO}_2$ ), druhý ve vystavení postupnému zvyšování a následně snižování koncentrace plynu od 0 do 1000 ppb s krokem 100 ppb. První typ testu je vhodný pro zjištění krátkodobé stability a doby odezvy a zotavení senzoru, druhý typ testu vypovídá více o citlivosti, hysterezi a detekčních limitech senzoru. Obr. 64 ukazuje odezvu senzoru s plochou pracovní elektrody  $3 \text{ mm}^2$  na první test. Charakter průběhu pro ostatní velikosti pracovních elektrod byl podobný a detaily ohledně doby odezvy a zotavení, citlivosti či limitu detekce jsou uvedeny v Tabulka 9.


 Obr. 64 Odezva senzoru na opakované vystavení koncentraci 1 ppm NO<sub>2</sub>

Tabulka 9 Parametry senzorů pro různé plochy pracovní elektrody

| Parametr                 | WE 8,5 mm <sup>2</sup> | WE 3 mm <sup>2</sup> | WE 0,8 mm <sup>2</sup> |
|--------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Citlivost (nA / 100 ppb) | 11                     | 5,5                  | 3,1                    |
| Doba odezvy (s)          | 130                    | 162                  | 140                    |
| Doba zotavení (s)        | 165                    | 216                  | 180                    |
| Opakovatelnost (± ppb)   | 117                    | 91                   | 112                    |
| Limit detekce (ppb)      | 10                     | 11                   | 8                      |
| Hystereze (%)            | 11                     | 10                   | 12                     |

Citlivost senzoru byla určena jako strmost kalibrační křivky senzorů z Obr. 65, kde každý bod představuje průměrnou hodnotu proudové odezvy senzoru při konkrétní koncentraci plynu. Z grafu je patrné že všechny velikosti senzorů vykazovaly lineární chování a také, že se zmenšující se aktivní plochou pracovní elektrody citlivost senzoru klesá. Je nutno dodat, že citlivost senzoru je ovlivněna i testovací komorou s membránou, která částečně omezuje množství plynu proudícího k senzoru. V předcházejících experimentech bylo zjištěno, že použitím difuzní membrány je snížena citlivost senzoru asi o 50 %. Nicméně membrány jsou v pouzdrech senzorů běžně používány proto, aby bylo zabráněno vniknutí nečistot k citlivým částem senzoru a aby byl přísun plynných molekul k pracovní elektrodě řízen difuzí, což přispívá ke stabilitě odezvy senzoru.



Obr. 65 Kalibrační křivka pro různé velikosti pracovní elektrody (WE)

Dynamické parametry (doba odezvy a doba zotavení) byly vyhodnoceny jako časový úsek od momentu skokového zvýšení / snížení koncentrace plynu do momentu, kdy proudová odezva dosáhla 90% / 10% maximální hodnoty. Hodnoty doby odezvy byly nižší než hodnoty doby zotavení a nebyla patrná jejich závislost na velikosti senzoru. Naměřené časy byly stejně jako citlivost ovlivněny testovací komorou s difuzní membránou. Z předchozích experimentů lze obecně říci, že časy jsou prodlouženy přibližně o 35% oproti měření bez membrány. Opakovatelnost může být za předpokladu normálního rozdělení hodnot charakterizována jako trojnásobek směrodatné odchylky měření proudu pro opakované měření (v tomto experimentu 10) při stejné koncentraci plynu (1 ppm). Z tabulky je patrné, že velikost senzoru má na opakovatelnost opět zanedbatelný efekt. Hystereze vypovídá o míře rozdílných reakcí senzoru vystavenému stejné koncentraci analytu při schodovém zvyšování a snižování koncentrace (tj. porovnává odezvu senzoru např. pro 500 ppb při postupném zvyšování z 0 na 1000 ppb a pro 500 ppb při postupném snižování z 1000 na 0 ppb). U senzorů je tedy žádoucí co nejnižší míra hystereze. Z dat je opět zřejmé, že ani výrazné zmenšení plochy senzoru nemělo na hysterezi významný vliv.

#### **4.2.1.4 Vyhodnocení**

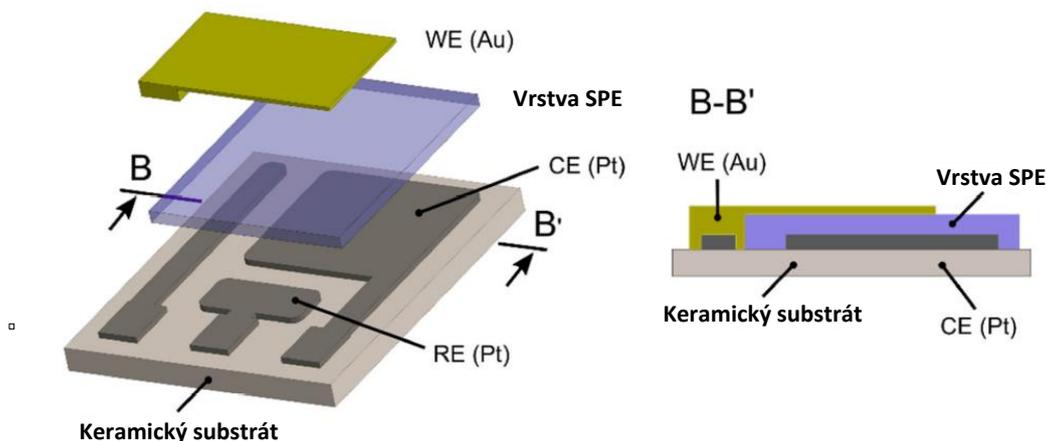
Pomocí technologie Aerosol Jet byl úspěšně miniaturizován senzor NO<sub>2</sub>. V rámci experimentu bylo dosaženo podstatného zmenšení plochy pracovní elektrody z původních 8 mm<sup>2</sup> na nejmenší vzorek 0,8 mm<sup>2</sup> a byla ověřena funkčnost a použitelnost připravených vzorků jako senzorů NO<sub>2</sub>. S případnou miniaturizací kontaktních plošek a zapouzdření by tak kompletní senzor zabíral plochu v řádu jednotek mm<sup>2</sup>. Oproti konvenčnímu senzoru je tento díky tiskovým technologiím také planární a prostorově tak zabírá podstatně menší objem. Nehrozí navíc únik elektrolytu, jelikož ten je tvořen pevnou látkou SPE. Tento senzor může být ve stejné konfiguraci připraven i na flexibilním substrátu (např. na polyamidové fólii) místo keramiky a nabídnout tak i další výraznou hmotnostní úsporu. Citlivost tohoto senzoru byla 3,1 nA / 100 ppb, což je velmi nízká hodnota proudu, nicméně stále přijatelná a měřitelná komerčně běžně dostupným potenciostatem LMP91000. Limit detekce 8 ppb je hodnota teoretická a pro její potvrzení by musela následovat řada náročnějších testů. Z experimentu je ale patrné, že tato hodnota není příliš závislá na velikosti senzoru. Dobu odezvy a dobu zotavení (140 s a 180 s) lze považovat za přijatelné pro naprostou většinu zamýšlených aplikací takového senzoru. Opakovatelnost 112 ppb ukazuje na velmi dobrou krátkodobou stabilitu odezvy senzoru. Maximální hystereze 12% pro 500 ppb (tj. uprostřed měřeného rozsahu 0-1000 ppb) odpovídá standardnímu rozsahu pro elektrochemické senzory plynů.

## 4.2.2 Senzor etylenu (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)

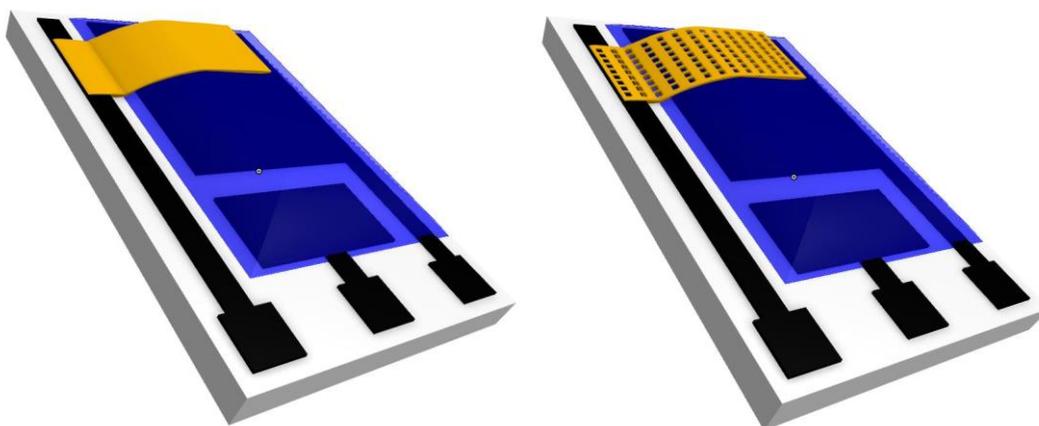
Etylen je plynná organická sloučenina se sumárním vzorcem C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, která nachází široké uplatnění v chemické průmyslové výrobě (např. výroba polystyrenu, etylenglykolu, etylenoxidu). Etylen je také významným fytohormonem (rostlinným hormonem), který má výrazný vliv na správný růst a vývoj rostlin a dozrávání plodů. Mezi druhy ovoce, které jsou tzv. klimakterické, tj. jejich dozrávání je spojeno se zvýšenou produkcí etylenu, se řadí např. rajčata, melouny, banány, jablka, papáji či avokáda. Mezi druhy, které klimakterické nejsou (nebo je jejich dozrávání závislé na etylenu jen velmi málo) se řadí např. citrusy, hrozny, papriky či jahody. Klimakterické druhy mohou být sklizeny nezralé a dále dozrávat samovolně po sklizni či lze jejich dozrávání etylenem uměle inicializovat a řídit. Bylo také zjištěno, že nízké koncentrace etylenu v klimakterickém ovoci dovedou výrazně prodloužit dobu skladování nezralého ovoce. Proces umělého dozrávání a jeho řízení je tedy jeden z důvodů, proč je kvalitní a levné monitorování koncentrace etylenu důležité. [69][70][71][72]

### 4.2.2.1 Topologie senzoru

Jelikož jde o elektrochemický senzor, jeho topologie je shodná s topologií z kapitoly 4.2.1. Změna je zde v použití jiných materiálů (Obr. 66) a technologií výroby. Odlišná iontová kapalina použitá v polymerním elektrolytu zde zajišťuje vhodné podmínky pro redoxní reakci etylenu na pracovní elektrodě. V následujícím experimentu byla otestována a ověřena možnost tisku pracovní elektrody pomocí technologie Aerosol Jet a dále byla otestována a ověřena možnost tisku pracovní elektrody ve formě mikromřížky (tj. pracovní elektroda s částečnou prostupností pro analyzovaný plyn – etylen). Jelikož mezi substrátem a vrchní plochou SPE je výškový (spojitý) rozdíl zhruba 150 μm, bylo velmi výhodné využít možnosti tisku pracovní elektrody ve vysokém rozlišení i na nerovné substráty bez pohybu osy Z u zařízení Aerosol Jet (Obr. 67).



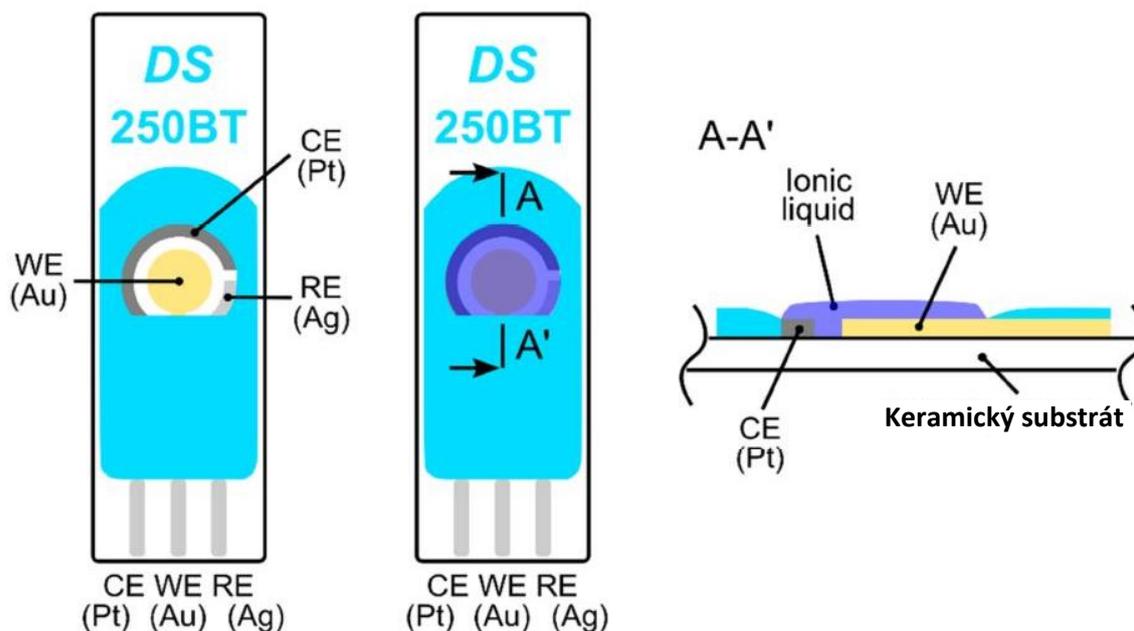
Obr. 66 Topologie senzoru etylenu



Obr. 67 3D vizualizace výsledného senzoru s vrstvou SPE (modře) a zlatou pracovní elektrodou (vlevo) a zlatou pracovní elektrodou ve formě mikromřížky (vpravo) tištěnými na nerovný povrch SPE

#### 4.2.2.2 Příprava vzorků

V rámci experimentu byly porovnávány tři typy senzorů. První typ (vzorek A) byl komerčně dostupný planární senzor DropSens 250BT (použitý jako referenční vzorek, Obr. 68). Další dva typy semi-planárních senzorů byly založeny na výrobě pomocí různých tiskových technologií. První z nich (vzorek B) cílil na masovější produkci (tj. ve velké míře využití síťotisku), druhý s využitím technologie Aerosol Jet (vzorek C) cílil na optimalizaci rozhraní SPE a pracovní elektrody. Vzorek A lze označit za zcela planární topologii, vzorek B a C za semi-planární.

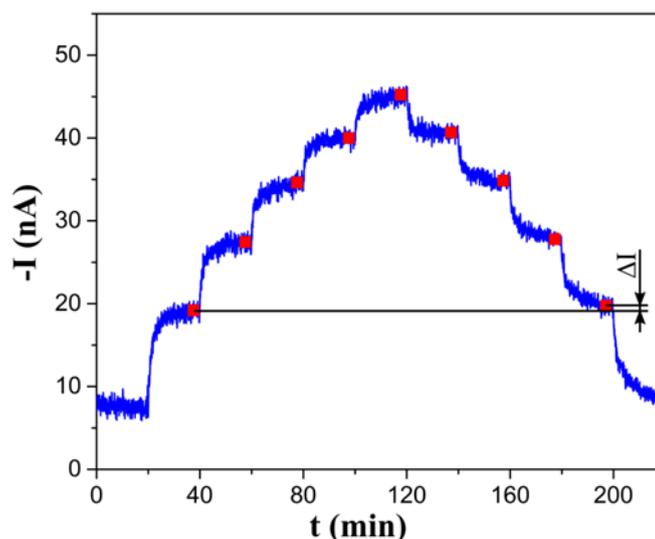


Obr. 68 Topologie komerčního senzoru etylenu DropSens 250BT

V následující části je detailněji popsána příprava vzorku C. Jako substrát byla použita keramická destička o rozměrech  $7 \times 9 \times 1$  mm. Elektrodotý systém (pomocná a pseudoreferenční elektroda a kolektor pracovní elektrody) byly v rámci tohoto experimentu připraveny z platiny mikrolitografickou technologií. Jako materiál pro SPE byl použit mix iontové kapaliny 1-butyl-3-metylimidazoliumbis (trifluormethylsolfonyl)imid (BMIM), polymeru poly(vinyliden) fluorid (PVDF) a rozpouštědla 1-metyl-2-pyrrolidon (NMP), všechny komponenty od firmy Sigma-Aldrich. Pracovní elektroda byla vytvořena technologií Aerosol Jet tiskem zlatého nanočásticového inkoustu Fraunhofer IKTS Au LT-20 s 20% obsahem zlatých nanočástic. Elektroda byla vytvořena jak ve formě homogenní vrstvy materiálu (tiskem 5 vrstev a 3 vrstev), tak ve formě zlaté mikromřížky. Po tisku pracovní elektrody byl materiál vysušen v laboratorní sušičce na  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  / 60 minut. Na závěr byly provedeny i experimenty, kdy byl senzor (vzorek D a vzorek E) vytvořen obdobným způsobem sítotiskem (vzorek D) a technologií Aerosol Jet (vzorek E), ovšem místo keramického substrátu byl použitý flexibilní polyimidový substrát DuPont Kapton. Pro vzorek E byla pomocí technologie Aerosol Jet tištěna nejen zlatá pracovní elektroda, ale nanočásticovým platinovým inkoustem Fraunhofer IKTS Pt-LT-20 i kompletní elektrodotý systém (pomocná a pseudoreferenční elektroda a kolektor pracovní elektrody).

### 4.2.2.3 Měření

Pro měření byla použita obdobná sestava, která je popsána výše v kapitole 4.2.1.3, resp. na Obr. 63. Jako kalibrační plyn byla použita směs etylenu se syntetickým vzduchem (1000 ppm). Pro měření bylo použito předpětí  $\pm 800$  mV mezi pracovní a pseudoreferenční elektrodou. Senzory byly kontaktovány pozlacenými pružinovými testovacími sondami a nebyly v tomto případě pro měření zakryty difuzní membránou. Během měření byly udržovány stálé podmínky (23 °C, 40% RH, normální tlak, průtok plynu 1 L/min). Pro vyhodnocení sloužil bipotenciostat/galvanostat DropSens  $\mu$ Stat400 připojený k PC. Senzory byly opět podrobeny dvěma typům testů. První z nich bylo opakované vystavení senzoru stejné koncentraci plynu (zde 10 x 300 ppm  $C_2H_4$ ), druhý ve vystavení postupnému zvyšování a následně snižování koncentrace plynu (v rozsahu 0 až 500 ppm s krokem 100 ppm (Obr. 69) a 0 až 100 ppm s krokem 2 ppm).



Obr. 69 Proudová odezva senzoru B na postupné zvyšování a snižování koncentrace etylenu v rozsahu 0 až 500 ppm s naznačeným měřením hystereze  $\Delta I$

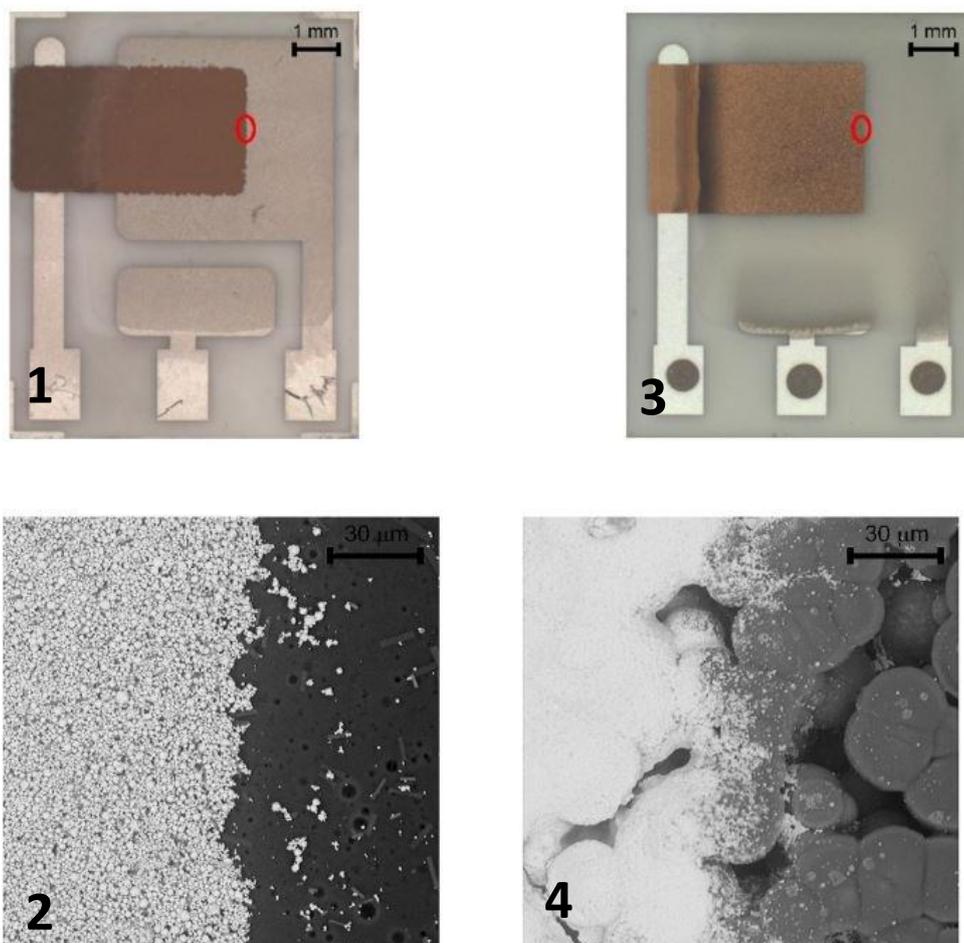
Naměřená data jsou shrnuta v Tabulka 10. Z hlediska citlivosti bylo u vzorku C (částečně připraveného pomocí technologie Aerosol Jet) dosaženo výrazného zlepšení nejen oproti referenčnímu planárnímu senzoru (vzorku A), ale i proti semi-planárnímu senzoru vytvořenému pomocí sítotisku (vzorek B). Pozornost byla věnována rozdílům mezi vzorkem B a C, které byly značné. První rozdíl byl v tloušťce jednotlivých vrstev, uvedených v Tabulka 11. Tloušťka pracovní elektrody u vzorku C je uvedena pro tisk pěti vrstev materiálu.

Tabulka 10 Parametry senzorů

| Parametr             | A (referenční) | B (sítotisk) | C (Aerosol Jet) |
|----------------------|----------------|--------------|-----------------|
| Citlivost (nA / ppm) | 0,064          | 0,074        | 1,164           |
| Doba odezvy (min)    | 1,48           | 0,98         | 6,67            |
| Doba zotavení (min)  | 1,4            | 1,18         | 6,76            |
| Opakovatelnost (%)   | 27             | 2            | 4               |
| Limit detekce (ppm)  | 39             | 26           | 0,8             |
| Hystereze (%)        | 6,7            | 3,3          | 4,4             |

Tabulka 11 Tloušťky vrstev u vzorku B a C

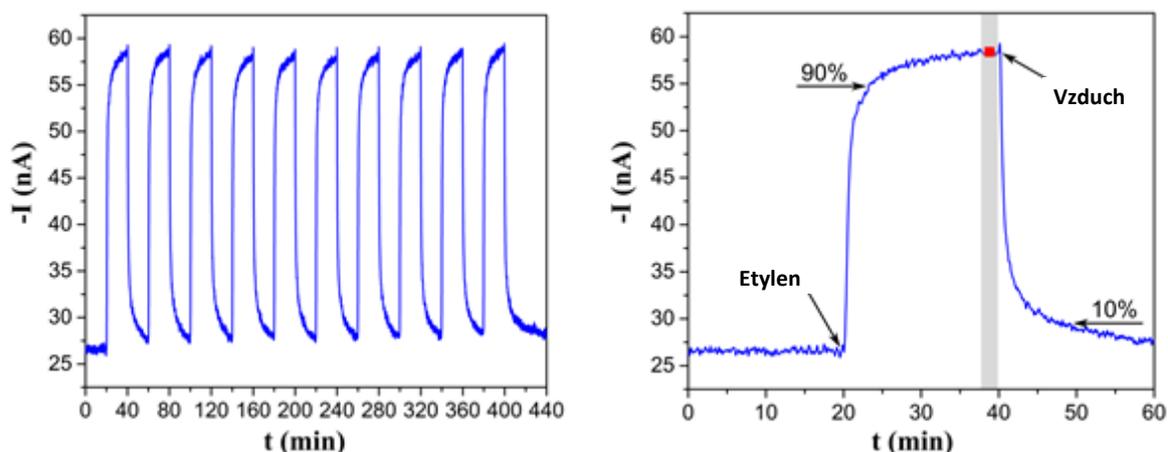
| Tloušťky vrstev    | Vzorek B         | Vzorek C          |
|--------------------|------------------|-------------------|
| Pracovní elektroda | 10 $\mu\text{m}$ | 2,5 $\mu\text{m}$ |
| SPE                | 15 $\mu\text{m}$ | 150 $\mu\text{m}$ |



Obr. 70 Vzorek B připravený pomocí sítotisku (1) a detail přechodu mezi polymerem a elektrodou (2) ; vzorek C připravený technologií Aerosol Jet (3) a detail přechodu mezi polymerem a elektrodou (4)

Na Obr. 70 je z mikroskopické inspekce také patrný rozdíl v morfologii vrstev SPE. Zatímco u vzorku B je patrná neporézní struktura SPE vrstvy (s několika drobnými kruhovými defekty), u vzorku C je patrná velmi porézní struktura s kulovitými objekty (polykrystalické sférolity) ve velikosti od 10 do 50  $\mu\text{m}$ . Tyto útvary byly kompletně pokryty tištěnou vrstvou zlatého inkoustu a díky tomuto jevu došlo ke zvětšení aktivní plochy kontaktu a tedy i k výraznému zvýšení citlivosti. Byly provedeny testy potisku takovéto výrazně porézní vrstvy SPE jak zlatým inkoustem určeným pro technologii Aerosol Jet, tak i zlatou sítotiskovou pastou s obdobnými výsledky. Bylo tedy potvrzeno, že právě porézní mikrostruktura SPE přispívá k výraznější citlivosti senzoru.

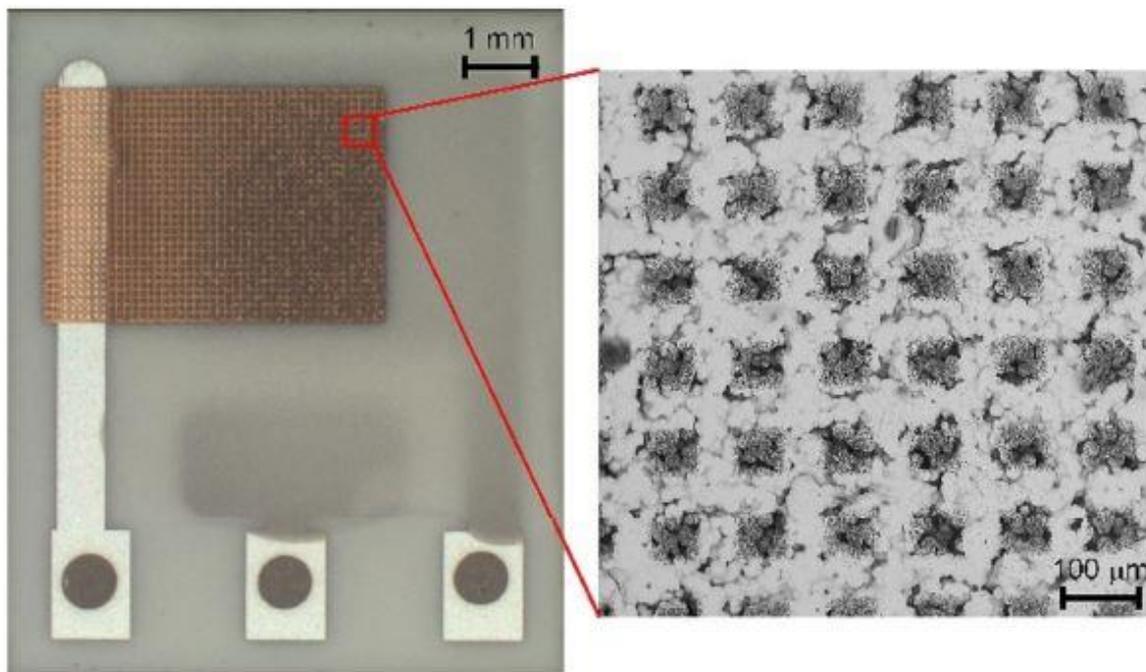
Další zajímavé výsledky byly zjištěny z hlediska dynamických parametrů (doba odezvy a doba zotavení, Obr. 71). Vzorek C měl dobu odezvy blížíci se 7 minutám, tj. více než 4x horší než ostatní vzorky. Zajímavé je opět porovnání vzorků B a C. Ač jsou oba vzorky založeny na semi-planární topologii, jejich dynamické parametry se značně lišily. I z Obr. 70 je patrná větší kompaktnost zlaté tištěné vrstvy u vzorku C.



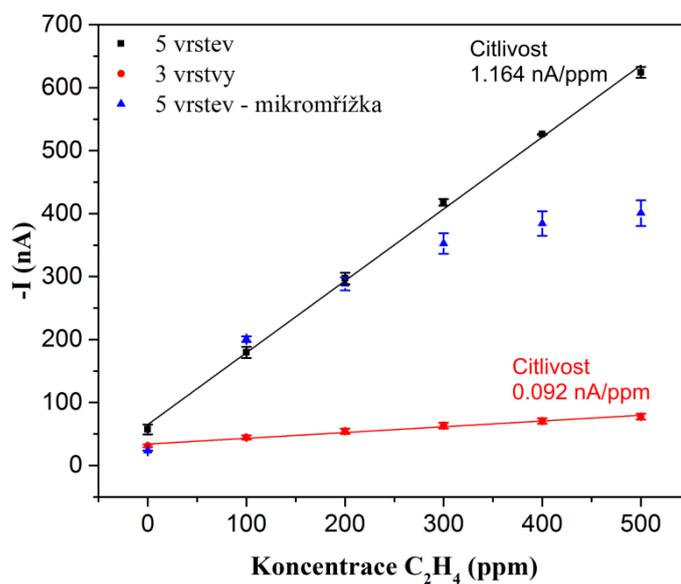
Obr. 71 Proudová odezva senzoru na cyklické vystavení 300 ppm etylenu (vlevo) a detail jednoho cyklu (vpravo) s naznačenými limity 10% a 90% maximální proudové odezvy pro měření dynamických parametrů

Další experimenty tedy směřovaly k úpravě a redukcí tloušťky pracovní elektrody. Byly navrženy dvě možné úpravy – tisk menšího počtu vrstev (původně pět) či tisk elektrody v podobě mikromřížky. Oproti původní variantě s pěti vrstvami tak byla navíc natištěna varianta se třemi a jednou vrstvou. V konfiguraci jednovrstvé pracovní elektrody ztratil senzor schopnost detekovat etylen a tato varianta tedy nebyla dále uvažována. Mikromřížka byla navržena se stejnou velikostí plochy a byla tvořena navzájem kolmými liniemi o šířce 50  $\mu\text{m}$  a vzdáleností mezi liniemi 100  $\mu\text{m}$  (Obr. 72).

Mikromřížka měla pětivrstvou strukturu. Výsledky měření dynamických parametrů a citlivosti původní a upravené pracovní elektrody jsou v Tabulka 12.



Obr. 72 Vzorek s tištěnou pracovní elektrodou ve formě pětivrstvé mikromřížky tištěné technologií Aerosol Jet



Obr. 73 Kalibrační křivky senzorů s kompaktní vícevrstvou strukturou a strukturou mikromřížky

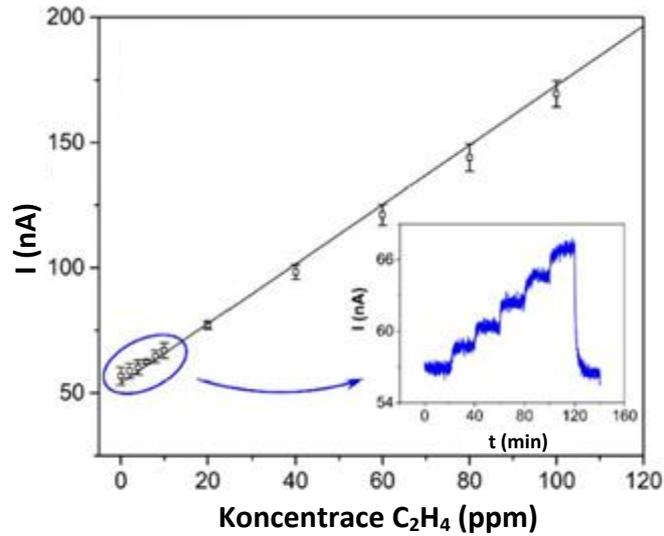
Tabulka 12 Výsledky optimalizace tištěné pracovní elektrody

| Parametr               | 5 vrstev<br>(původní varianta) | 3 vrstvy | 5 vrstev<br>mikromřížka |
|------------------------|--------------------------------|----------|-------------------------|
| Citlivost (nA / ppm)   | 1,164                          | 0,092    | -                       |
| Doba odezvy (min)      | 6,67                           | 1,65     | 3,82                    |
| Doba zotavení<br>(min) | 6,76                           | 2,26     | 3,76                    |

Z výsledků je patrné, že třívrstvá i pětivrstvá mikromřížková pracovní elektroda výrazně zlepšila dynamické parametry oproti pětivrstvé variantě. Pro nově navržené struktury pracovních elektrod je ovšem opět patrný výrazný pokles citlivosti. Pro elektrodu s mikromřížkovou strukturou nelze citlivost v celém rozsahu určit, protože senzor vykazoval lineární chování do koncentrace analytu 200 ppm, pak již proud se zvyšující se koncentrací rostl výrazně pomaleji (Obr. 73). Z mikroskopické inspekce byly na mikromřížkové struktuře objeveny drobné defekty (detail na Obr. 72), které pravděpodobně mohly vést k elektrické izolaci části mřížky. Z tohoto důvodu je možné, že chování senzoru bylo nelineární. Tyto mikrotrhlínky byly pozorovány i u kompaktní pěti a třívrstvé elektrody, ovšem zde je již velmi malá pravděpodobnost, že by trhlínky jako u mikromřížky zabránily průchodu elektrického proudu na části elektrody. Výrazné zlepšení dynamických parametrů bylo v tomto případě tedy na úkor citlivosti a linearity.

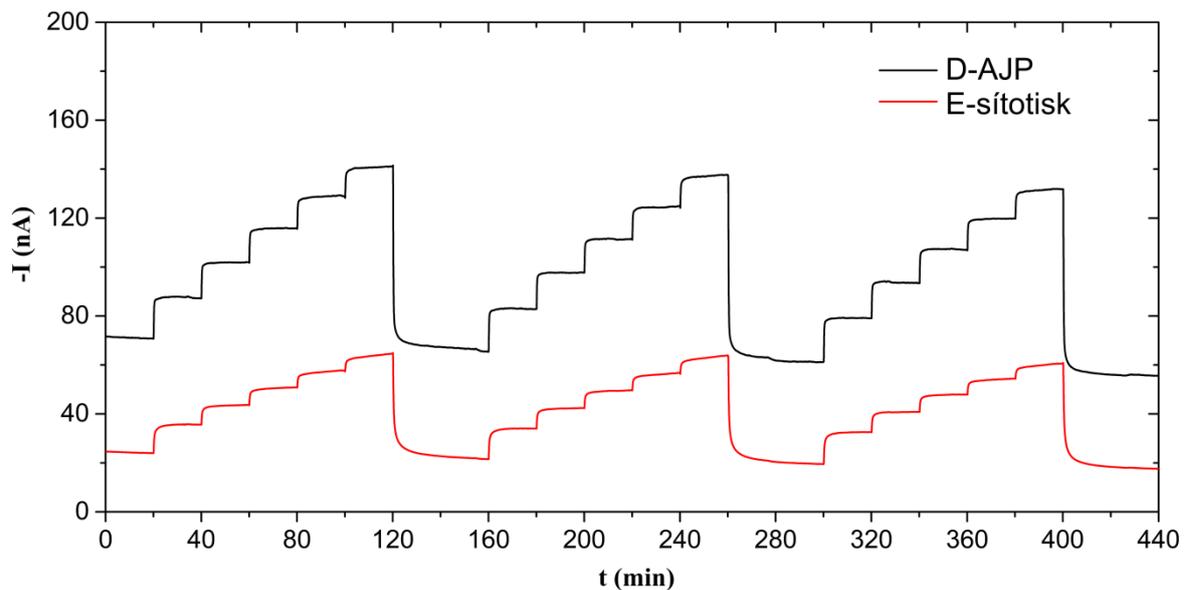
Opakovatelnost byla pro vzorky B a C výrazně horší než pro referenční vzorek A. Některé vzorky vykazovaly stále nižší opakovatelnost během vystavování stejným koncentracím etylenu. Tyto problémy se vyskytly a byly popsány již v předchozích experimentech [73]. Nejpravděpodobnější příčinou je tvorba oxidační vrstvy na pracovní elektrodě, která zabraňuje oxidaci etylenu a tedy i jeho detekci. Větší hodnota předpětí mezi pracovní a pseudoreferenční elektrodou na jednu stranu zvyšuje citlivost senzoru, na stranu druhou ale zřejmě přispívá k výraznější tvorbě oxidové vrstvy.

Pro stanovení limitu detekce byla měřena kalibrační křivka od 0 do 100 ppm s krokem 2 ppm. V detailu je graf z tohoto měření na Obr. 74. Nejnižší limity detekce byly zjištěny u vzorku C (Tabulka 10). Nízká hodnota byla zřejmě výsledkem porézní mikrostruktury SPE vrstvy a velké kontaktní plochy s pracovní elektrodou a tedy i vysokou citlivostí senzoru.



Obr. 74 Kalibrační křivka pro koncentraci 0-100 ppm

Dále byly experimentálně připraveny vzorky D a E na flexibilním substrátu DuPont Kapton. Zlatá pracovní elektroda pro vzorek E byla tištěna v kompaktní třívrstvé variantě. Měření flexibilních planárních senzorů probíhalo obdobně, jako u vzorku A, B a C, data z měření jsou shrnuta v Tabulka 13, graf na Obr. 75.



Obr. 75 Proudová odezva flexibilních senzorů na postupné zvyšování a snižování koncentrace etylenu v rozsahu 0 až 500 ppm

Tabulka 13 Parametry flexibilních senzorů

| Parametr             | D (sítotisk) | E (Aerosol Jet) |
|----------------------|--------------|-----------------|
| Citlivost (nA / ppm) | 0,078        | 0,14            |
| Doba odezvy (min)    | 0,67         | 2,33            |
| Doba zotavení (min)  | 0,83         | 3,88            |
| Limit detekce (ppm)  | 0,9          | 0,8             |
| Hystereze (%)        | 10           | 10              |

#### 4.2.2.4 Vyhodnocení

V experimentech byly prezentovány funkční ampérometrické senzory etylénu se semi-planární topologií připravené za pomoci tiskových technologií. Využití pevnolátkového elektrolytu SPE v této topologii má řadu výhod, jako je absence tekutého elektrolytu (a tedy nutného rezervoáru pro tekutinu) či vysokou citlivost a relativně snadná možnost studování morfologie SPE vrstvy a přechodu mezi pracovní elektrodou a SPE. Z výsledků je patrné že díky technologii Aerosol Jet lze nekonvenčními způsoby upravovat tvar či tloušťku pracovní elektrody a výrazně tak měnit některé parametry senzoru. Pracovní elektrodu lze tisknout i ve formě mikromřížky, což by jinými v současnosti dostupnými technologiemi bylo jen velmi obtížné až nemožné. Sensor lze připravit také ve flexibilním provedení na polyimidovém substrátu a jako vedlejší efekt (tj. mimo ohebnost) tím také výrazně snížit jeho hmotnost.

## Závěr

Tištěná elektronika je termín, který zahrnuje depozici funkčních materiálů pomocí tiskových technologií na substráty (velmi často ohebné fólie) a tvorbu funkčních elektronických celků či jejich částí. Velmi důležitou součástí tištěné elektroniky jsou tiskové technologie a nové materiály.

Jednou z nejnovějších tiskových technologií je Aerosol Jet. Tato tisková technologie umožňuje využití široké škály viskozit materiálů, tisk s velmi vysokým rozlišením a tisk na nerovné či 3D povrchy. Svými vlastnostmi velmi dobře doplňuje zavedené tiskové technologie (např. sítotisk, inkoustový tisk, dávkování) a posouvá možnosti tištěné elektroniky zvláště z hlediska využívání nových materiálů a miniaturizace elektronických prvků. Důležitou součástí tištěné elektroniky je tedy i výzkum a vývoj nových pokročilých materiálů (např. organických či anorganických na bázi nanočástic), které poskytují tištěným elektronickým prvkům lepší vlastnosti a umožňují často jejich extrémní miniaturizaci nebo dávají takovým prvkům přidanou hodnotu v podobě ohebnosti či pružnosti. Díky novým materiálům je trendem vývoje i tištěná elektronika, která je plně biologicky rozložitelná.

V oblasti TPC technologie byly vytvořeny a ověřeny vlastnosti plně tištěných rezistorů z nanočásticového inkoustu na bázi CuNi. Zařízení Aerosol Jet zde posloužilo přesně svému účelu – pomocí nanočásticového materiálu na bázi CuNi byla technologie tisku CuNi odporů pro TPC technologii experimentálně ověřena, patentována (Způsob výroby rezistoru pro výkonové aplikace, číslo patentu CZ 308757 B6) a nyní probíhá vývoj do té doby komerčně nedostupné CuNi sítotiskové pasty, která dovede přenést výrobu z laboratorní kusové (Aerosol Jet) na výrobu více sériovou (sítotisk). V rámci TPC technologie byly zkoumány i možnosti kontaktování konvenčních SMD výkonových součástek pomocí tiskové technologie opět s kladnými výsledky. Byla úspěšně kontaktována výkonová dioda a přes tištěné kontakty bylo možné přenášet proud až 36 A. Dále byl obdobným způsobem nakontaktovaný čip pro koncentrovanou fotovoltaiku (CPV).

V oblasti kontaktování konvenčních SMD součástek tiskovou technologií k nízkoteplotním substrátům se vyskytla řada problémů. Použitý vodivý inkoust (který umožňoval vytvrzení při nízké teplotě) velmi špatně smáčel všechna dostupná dielektrika. I při intenzivním plasmaickém ošetření dielektrik byla smáčivost na dielektrických vrstvách velmi špatná, ovšem na jiných místech byla naopak příliš vysoká. Problémem se také ukázalo být

UV vytvrzování dielektrik v silnější vrstvě a jejich rozdílná teplotní roztažnost proti použitému substrátu (při vytvrzování vodivého inkoustu se tvořily ve vodivém inkoustu trhliny na přechodu dielektrikum – substrát). Tento jev se nevyskytoval u TPC technologie (viz výše), kde byl navíc použit i jiný typ inkoustu (vytvrzení při podstatně vyšší teplotě nevhodné pro PET substráty). Nízká opakovatelnost a velmi vysoká pracnost procesu tedy vedla k myšlence kontaktovat součástky pouze pomocí depozice UV tvrditelného nevodivého lepidla. Technologie kontaktování spočívá v nanesení lepidla na místo na substrátu s ploškami pro osazovanou součástku, osazení součástky a jejího relativně silného přitlaku na substrát. Tím dojde k většinovému vytlačení lepidla mezi vodivými ploškami na substrátu a ploškami součástky. Při stále zachovaném přitlaku je pak lepidlo vytvrzeno UV zářením (u průsvitných substrátů oboustranně) a během několika sekund je součástka přikontaktována. Samotné vodivé propojení je tedy tvořeno pouhým fyzickým dotykem vodivých plošek a fixace tohoto dotyku UV tvrditelným lepidlem. Obrovskou výhodou této technologie je, že umožňuje nejen kontaktování součástek na ohebné nízkoteplotní substráty využívané pro tištěnou elektroniku, ale umožňuje velmi kvalitní a velmi odolné kontaktování součástek na různé typy vodivých textilií (pleteniny či tkaniny). Tento typ spoje byl podroben velkému množství testů (statické a dynamické ohýbací testy, testy zrychleného stárnutí suchým teplem, vlhkým teplem, šokové teplotní testy, testy proudovým zatížením, testy v korozivní atmosféře a pro textilní substráty navíc testy pratelnosti, mechanického natahování a trhání či dlouhodobého vystavení syntetickému potu) a vykazuje velmi slibné výsledky – vysokou spolehlivost, odolnost, rychlost vytvoření, jednoduchost či nízkou cenu a snadnou automatizaci procesu výroby.

V oblasti realizace tištěných sensorových elementů byl realizován sensorový element teploty na vlákenné struktuře. Elektroodový systém byl tvořen stříbrným nanočásticovým inkoustem, aktivní vrstva senzoru tenkou vrstvou inkoustu na bázi oxidu grafenu. Délka senzoru byla 100 mm a byl vytvořen ve verzi s jednoduchým a zdvojeným elektroodovým systémem s celkovou šířkou 200  $\mu\text{m}$  respektive 400  $\mu\text{m}$ . Pro senzory byla vytvořena kalibrační křivka (pro teplotu 0 °C až 60 °C) a senzory vykazovaly NTC charakter (se zvyšující se teplotou se snižoval jejich odpor). Z hlediska hystereze se jevil lépe senzor s jednoduchým elektroodovým systémem (3,0 % z měřené hodnoty odporu) oproti zdvojenému (10,2 % z měřené hodnoty odporu). Takovéto senzory mohou najít uplatnění integrované např. v inteligentním oblečení pro hasiče, kde je potřeba snímat teplotu nejen uvnitř či vně obleku, ale také v různých mezivrstvách a na různých místech a pomocí

vyhodnocovací elektroniky a algoritmů odhadovat zbývající tepelnou kapacitu obleku a včas varovat hasiče před hrozícím opařením.

V oblasti tištěných elektrochemických senzorů byly provedeny experimenty se senzory oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ) a etylenu ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ).  $\text{NO}_2$  je toxický plyn, vznikající nejčastěji při spalování fosilních paliv. Při vdechování způsobuje dýchací potíže a může se podílet na vzniku nádorových onemocnění, v prostředí pak může být původcem kyselých dešťů. Technologií Aerosol Jet byla v rámci experimentů provedena značná miniaturizace elektrochemického senzoru  $\text{NO}_2$  (z původní velikosti pracovní elektrody  $8,5 \text{ mm}^2$  na  $3 \text{ mm}^2$  a následně až na  $0,8 \text{ mm}^2$ ) a byly ověřeny statické a dynamické parametry tohoto senzoru, které byly vyhovující i po značné miniaturizaci.

$\text{C}_2\text{H}_4$  je plynná organická sloučenina hojně využívaná v chemickém průmyslu. Tato sloučenina je také významný fytohormon (růstový hormon) rostlin a podílí se na dozrávání určitých typů plodin. Vystavením či naopak zamezením působení  $\text{C}_2\text{H}_4$  lze tedy velmi dobře řídit dozrání proces plodin citlivých na jeho působení. S využitím vlastností technologie Aerosol Jet byly zkoumány možnosti a vlastnosti tisku zlaté pracovní elektrody pro senzor  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Byla tištěna různá tloušťka pracovní elektrody a byl testován i tisk a následný vliv změny topologie elektrody ze zlatem vyplněného obdélníku na zlatou mikromřížku. Je patrné, že změny pracovní elektrody měly vliv hlavně na citlivost senzoru a jeho dynamické parametry. Tento senzor byl také připraven ve flexibilním provedení na ohebném fóliovém polyimidovém substrátu a všechny takto vytvořené senzory byly opět plně využitelné pro spolehlivou detekci  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Oproti konvenčním senzorům přináší takto tištěné planární senzory výhodu v podobě menší velikosti, nižší hmotnosti a případně ohebnosti. Využití tiskových technologií a z nich plynoucí malá tloušťka a vysoká planarita senzorů přináší tedy hlavně technologické výhody (snazší integrace, menší pouzdro, levnější a snadnější hromadná výroba), nikoliv výhody které by se týkaly samotných parametrů senzorů. Tyto typy elektrochemických senzorů, které využívají pevnolátkový elektrolyt, také přináší určitou výhodu z hlediska bezpečnosti, protože oproti konvenčnímu senzoru nehrozí únik a kontaminace okolí tekutým elektrolytem (který je u konvenčních senzorů často na bázi kyselin).

Tisková technologie Aerosol Jet tedy výrazně rozšiřuje možnosti konvenčních tiskových technologií a přináší obrovské možnosti hlavně v rámci vysokého rozlišení tisku, snadného tisku na nerovné povrchy a využívání širokého spektra nových nanočásticových či organických materiálů. Tato technologie je ideálním prvkem vývojového řetězce, kde je pomocí technologie Aerosol Jet nejprve navržena a otestována vhodná topologie či materiálová skladba tištěného prvku a následně je tedy možné snadněji a rychleji přejít na výrobu pomocí některé z běžně dostupných konvenčních technologií (např. sítotisk), které umožňují i větší sériovost výroby. Tato technologie má uplatnění nejen při vývoji tištěné elektroniky, ale díky svým možnostem depozice může být do budoucnosti i velmi zajímavou technologií pro výzkum a vývoj v oblasti biologických a biomedicinských aplikací.

## Shrnutí

Tato disertační práce se zabývá tištěnou elektronikou, zejména pak využitím unikátní tiskové technologie Aerosol Jet v této oblasti. V teoretické části práce je shrnut současný stav poznání a jsou popsány jedny z nejběžněji využívaných selektivních tiskových technologií, jako je sítotisk, dávkování a inkoustový tisk. Detailněji je popsána technologie Aerosol Jet, její součásti a možnosti tisku. V práci jsou také popsány perspektivní oblasti využití tiskových technologií v elektronice.

Experimentální část práce je zaměřena na oblast technologického procesu vytváření a kontaktování elektronických součástek tiskovými metodami a na oblast realizace plně tištěných sensorových elementů. V první oblasti byly realizovány tištěné vícevrstvé rezistory pro technologii TPC z CuNi nanočásticového inkoustu. Tato metoda vytváření rezistorů s využitím technologie tisku aerosolu byla patentována (číslo patentu CZ 308757 B6). Dále byly provedeny experimenty s kontaktováním součástek pomocí tisku nanočásticového vodivého inkoustu pro TPC technologii (keramické substráty) a pro nízkoteplotní substráty (PET fólie). Z hlediska nízkoteplotních substrátů bylo vytváření kontaktů tiskem vodivého inkoustu velmi pracné a potýkalo se s řadou problémů, byla proto vytvořena technologie vodivého kontaktování pomocí dávkování UV tvrditelného nevodivého lepidla. Tato technologie umožňuje snadné a rychlé kontaktování SMD součástek nejen k nízkoteplotním substrátům (fólie, papír) ale i na vodivé textilie (tkaniny, pleteniny). V druhé oblasti byly realizovány plně tištěné senzory teploty na vlákenné struktuře a elektrochemické senzory oxidu dusičitého ( $\text{NO}_2$ ) a etylenu ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Plně tištěné planární sensorové elementy mohou mít oproti konvenčním sensorům řadu výhod – nízkou hmotnost, malou velikost, ohebnost, nízkou cenu či biologickou rozložitelnost. Byly úspěšně navrženy a otestovány senzory teploty na vlákenných strukturách, výrazně miniaturizovány senzory  $\text{NO}_2$  a navrženy a otestovány různé topologie pracovní elektrody sensorů  $\text{C}_2\text{H}_4$  s pozitivními výsledky.

Experimenty provedenými v disertační práci bylo prokázáno, že technologie Aerosol Jet může být klíčovým prvkem pro výzkum a vývoj v oblasti tištěné elektroniky a díky širokému spektru tisknutelných materiálů a vysokému rozlišení tisku může urychlit rozvoj využívání nanočásticových či organických materiálů v elektronice nové generace.

## Summary

This thesis is focused on printed electronics, especially with utilizing Aerosol Jet printing technology. The most common selective printing technologies such as screen printing, dispensing and inkjet are described in theoretical part. Aerosol Jet printing technology in particular is described in detail and its capabilities are presented. The utilizing of printing technologies in electronics is also explored.

The experimental part is focused in field of technological process of creating and interconnection of electronic components by printing technologies and in the field of realization of fully printed sensor elements. In the first field, the printed multilayer resistors for TPC technology printed by CuNi nanoparticle conductive ink were realized. This method of creating printed resistors utilizing Aerosol Jet was patented (patent number CZ 308757 B6). Furthermore interconnecting of electronic components for TPC technology (ceramic substrates) and for low temperature (e.g. PET) substrates were realized. Creating contacts for low temperature substrates was very arduous and many problems with adhesion and wettability had occurred. Therefore, the new technology based on dispensing of UV curable non conductive adhesive was created and tested. This technology allowed easy and fast contacting of SMD components not only for low temperature substrates such as PET or paper, but also for e-textile (smart textile) substrates (woven or knitted conductive fabrics). In the second part, fully printed sensors of temperature on thread-like structures and electrochemical sensors of nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) and ethylene ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) were realized. Fully printed planar sensing elements have many advantages in comparison to conventional sensors – low weight, small size, flexibility, low cost or biodegradability. Temperature sensors on thread-like structures were designed and successfully tested. An electrochemical sensor of  $\text{NO}_2$  was considerably miniaturized and new topologies of working electrode for  $\text{C}_2\text{H}_4$  electrochemical sensor were designed and tested with promising results.

To summarize, all the experiments in thesis have shown that Aerosol Jet can be a key technology for research and development in field of printed electronics and thank to its wide range of usable materials and high definition of printing it can boost the development of utilizing nanoparticle or organic materials in new generation of electronics.

## Resumen

Esta disertación trata sobre la electrónica impresa, especialmente centrada en el uso de la tecnología de impresión Aerosol Jet. La parte teórica de la tesis resume el conocimiento actual y describe algunas de las tecnologías de impresión selectiva más utilizadas, como la serigrafía, la dosificación y la impresión por inyección de tinta. La tecnología Aerosol Jet, sus componentes y las opciones de impresión se describen con más detalle. Esta disertación también describe áreas prometedoras del uso de tecnologías de impresión en electrónica.

La parte experimental del trabajo se centra en el proceso tecnológico de creación, el contacto de componentes electrónicos mediante métodos de impresión y en la realización de sensores electrónicos totalmente impresos. En la primera fase, se realizaron resistencias multicapa impresas para tecnología TPC fabricadas con tinta de nanopartículas de CuNi. Este método de creación de resistencias utilizando tecnología de impresión en aerosol ha sido patentado (número de patente CZ 308757 B6). Además, se realizaron experimentos con componentes de contacto mediante la impresión de tinta conductora nanoparticulada para tecnología TPC (sustratos cerámicos) y para sustratos de baja temperatura (películas PET). La creación de contactos para los sustratos de baja temperatura fue compleja, presentando problemas de adhesión y permeabilidad. Por consiguiente, se creó la tecnología de contacto conductivo mediante la dosificación de adhesivo no conductor curable por UV. Esta tecnología permite un contacto fácil y rápido de los componentes SMD no solo con sustratos de baja temperatura (láminas, papel) sino también con textiles conductores (tejidos, prendas de punto). En la segunda fase, se implementaron sensores de temperatura totalmente impresos en la estructura fibrosa y sensores electroquímicos de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). Los elementos de sensor planos completamente impresos pueden tener una serie de ventajas sobre los sensores convencionales: bajo peso, tamaño pequeño, flexibilidad, bajo coste o biodegradabilidad. Los sensores de temperatura en estructuras fibrosas se diseñaron y probaron con éxito. Los sensores de  $\text{NO}_2$  se miniaturizaron significativamente y varias topologías de electrodos de sensores  $\text{C}_2\text{H}_4$  se diseñaron y probaron con resultados prometedores.

Los experimentos realizados en la tesis han demostrado que la tecnología Aerosol Jet puede ser un elemento clave para la investigación y el desarrollo en el campo de la electrónica impresa. Gracias a una amplia gama de materiales imprimibles y una alta resolución de impresión, puede acelerar el desarrollo de materiales nanoparticulados u orgánicos en la próxima era de la electrónica.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] M. R. Swaine and P. A. Freiburger, "ENIAC," *Encyclopædia Britannica*. Encyclopædia Britannica, inc., 2017, [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/ENIAC>.
- [2] D. R. Gamota, K. Brazis, Paul Kalyanasundaram, and J. Zhang, *Printed Organic and Molecular Electronics*. Boston, MA: Springer US, 2004.
- [3] C. House, B. Road, and C. Ferrers, "4-NH3-100 Ammonia Sensor," 2016. [Online]. Available: [https://euro-gasman.com/media/wysiwyg/Gas\\_Sensors/SOLIDSENSE/4\\_NH3\\_100\\_1.pdf](https://euro-gasman.com/media/wysiwyg/Gas_Sensors/SOLIDSENSE/4_NH3_100_1.pdf).
- [4] K. K. Christenson, J. a Paulsen, M. J. Renn, K. Mcdonald, J. Bourassa, and S. Paul, "Direct Printing of Circuit Boards Using Aerosol Jet ®," *NIP 27 Digit. Fabr.*, pp. 433–436, 2011.
- [5] T. Alam, "A Reliable Communication Framework and Its Use in Internet of Things (IoT)," *Int. J. Sci. Res. Comput. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 5, no. May, 2018, doi: 10.36227/techrxiv.12657158.
- [6] P. Mach, V. Skočil, and J. Urbánek, *Montáž v elektrotechnice*, 1st ed. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [7] "FluidANT – FluidANT, a full 3D capable conductive ink print system, engineered to create printed electronics on 3D surfaces using a modern fully software controlled high volume production process.," 2018. <http://fluidant.com/> (accessed Apr. 04, 2018).
- [8] J. J. Adams *et al.*, "Conformal printing of electrically small antennas on three-dimensional surfaces," *Adv. Mater.*, vol. 23, no. 11, pp. 1335–1340, 2011, doi: 10.1002/adma.201003734.
- [9] "Svět tisku - Sítotisk a jeho využití." [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=7807](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=7807) (accessed Apr. 04, 2018).
- [10] "Svět tisku - Sítotisk a jeho řešení." [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=6716](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=6716) (accessed Apr. 04, 2018).
- [11] Patrik Thoma, "Svět tisku - Sítotiskové rámy a síťovina," 7-8, 2005. [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=1717](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717) (accessed Apr. 04, 2018).
- [12] Patrik Thoma, "Svět tisku - Sítotiskové těrky," 12, 2005. [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=2114](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=2114) (accessed Apr. 04, 2018).
- [13] G. C. Dubey, "The squeegee in printing of electronic circuits," *Microelectron. Reliab.*, vol. 14, no. 5–6, pp. 427–429, 1975, doi: 10.1016/0026-2714(75)90151-1.
- [14] B. Derby, "Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 395–414, 2010, doi: 10.1146/annurev-matsci-070909-104502.
- [15] T. Seifert, E. Sowade, F. Roscher, M. Wiemer, T. Gessner, and R. R. Baumann, "Additive manufacturing technologies compared: Morphology of deposits of silver ink using inkjet and aerosol jet printing," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 54, no. 2, pp. 769–779, 2015, doi: 10.1021/ie503636c.
- [16] J. R. Castrejón-Pita, W. R. S. Baxter, J. Morgan, S. Temple, G. D. Martin, and I. M. Hutchings, "Future, opportunities and challenges of inkjet technologies," *At. Sprays*, vol. 23, no. 6, pp. 571–595, 2013, doi: 10.1615/AtomizSpr.2013007653.
- [17] Fujifilm, "Dimatix Materials Printer DMP-2850 Data Sheet," *Fujifilm Support Doc.*,

- no. Rev 03, pp. 1–2, 2016, [Online]. Available: [https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/dimatix\\_materials\\_printer\\_dmp-2850.pdf](https://www.fujifilmusa.com/shared/bin/dimatix_materials_printer_dmp-2850.pdf).
- [18] Optomec Inc., “Additive Manufacturing Systems,” 2018. <http://www.optomec.com/> (accessed Apr. 03, 2018).
- [19] OPTOMECC, “Aerosol Jet ® Printed Electronics Overview,” p. 6, [Online]. Available: [http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ\\_Printed\\_Electronics\\_Overview\\_whitepaper.pdf](http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Printed_Electronics_Overview_whitepaper.pdf).
- [20] N. J. Wilkinson, M. A. A. Smith, R. W. Kay, and R. A. Harris, “A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 11, pp. 4599–4619, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03438-2.
- [21] A. A. Gupta, A. Bolduc, S. G. Cloutier, and R. Izquierdo, “Aerosol Jet Printing for printed electronics rapid prototyping,” *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, vol. 2016-July, pp. 866–869, 2016, doi: 10.1109/ISCAS.2016.7527378.
- [22] E. W. C. Phuah, W. L. Hart, H. Sumer, and P. R. Stoddart, “Patterning of biomaterials by aerosol jet printing: A parametric study,” *Bioprinting*, vol. 18, no. August 2019, p. e00081, 2020, doi: 10.1016/j.bprint.2020.e00081.
- [23] G. Chen, Y. Gu, H. Tsang, D. R. Hines, and S. Das, “The Effect of Droplet Sizes on Overspray in Aerosol-Jet Printing,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 20, no. 8, pp. 1–13, 2018, doi: 10.1002/adem.201701084.
- [24] Y. Xiao, K. Kalaitzidou, D. Yao, W. H. Yeo, and T. A. L. Harris, “Challenges and Advances in Aerosol Jet Printing of Regenerated Silk Fibroin Solutions,” *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 12, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1002/admi.201902005.
- [25] Optomec Inc, “Aerosol Jet Material faq,” [Online], 2014, [Online]. Available: [http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ\\_Materials\\_FAQs\\_DS\\_v3.pdf](http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/AJ_Materials_FAQs_DS_v3.pdf).
- [26] K. Obata, U. Klug, J. Koch, O. Suttmann, and L. Overmeyer, “Hybrid micro-stereolithography by means of aerosol jet printing technology,” *J. Laser Micro Nanoeng.*, vol. 9, no. 3, pp. 242–247, 2014, doi: 10.2961/jlmn.2014.03.0012.
- [27] C. Goth, S. Putzo, and J. Franke, “Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications,” *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, pp. 1211–1216, 2011, doi: 10.1109/ECTC.2011.5898664.
- [28] Ceradrop, “Ceradrop Ceraprinter F-Serie,” 2018. [http://www.ceradrop.com/content/uploads/2016/04/CeraPrinter\\_F-Serie.pdf](http://www.ceradrop.com/content/uploads/2016/04/CeraPrinter_F-Serie.pdf).
- [29] G. L. Goh, S. Agarwala, Y. J. Tan, and W. Y. Yeong, “A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 260, pp. 227–235, 2018, doi: 10.1016/j.snb.2017.12.127.
- [30] N. X. Williams, N. Watson, D. Y. Joh, A. Chilkoti, and A. D. Franklin, “Aerosol jet printing of biological inks by ultrasonic delivery,” *Biofabrication*, vol. 12, no. 2, p. 025004, Feb. 2020, doi: 10.1088/1758-5090/ab5cf5.
- [31] V. Correia *et al.*, “Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development,” *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 364–371, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.11.016.
- [32] M. Michel, C. Biswas, and A. B. Kaul, “High-performance ink-jet printed graphene resistors formed with environmentally-friendly surfactant-free inks for extreme thermal environments,” *Appl. Mater. Today*, vol. 6, pp. 16–21, 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2016.12.001.
- [33] S. Jung, A. Sou, E. Gili, and H. Sirringhaus, “Inkjet-printed resistors with a wide resistance range for printed read-only memory applications,” *Org. Electron. physics*,

- Mater. Appl.*, vol. 14, no. 3, pp. 699–702, 2013, doi: 10.1016/j.orgel.2012.12.034.
- [34] N. Graddage, T. Y. Chu, H. Ding, C. Py, A. Dadvand, and Y. Tao, “Inkjet printed thin and uniform dielectrics for capacitors and organic thin film transistors enabled by the coffee ring effect,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 29, pp. 114–119, 2016, doi: 10.1016/j.orgel.2015.11.039.
- [35] G. McKerricher, R. Maller, V. Mohammad, M. A. McLachlan, and A. Shamim, “Inkjet-printed thin film radio-frequency capacitors based on sol-gel derived alumina dielectric ink,” *Ceram. Int.*, vol. 43, no. 13, pp. 9846–9853, 2017, doi: 10.1016/j.ceramint.2017.04.167.
- [36] D. Sette, V. Kovacova, and E. Defay, “Printed Barium Strontium Titanate capacitors on silicon,” *Thin Solid Films*, vol. 589, pp. 111–114, 2015, doi: 10.1016/j.tsf.2015.04.087.
- [37] J. Chang, X. Zhang, T. Ge, and J. Zhou, “Fully printed electronics on flexible substrates: High gain amplifiers and DAC,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 15, no. 3, pp. 701–710, 2014, doi: 10.1016/j.orgel.2013.12.027.
- [38] A. M. Gaikwad, D. A. Steingart, T. Nga Ng, D. E. Schwartz, and G. L. Whiting, “A flexible high potential printed battery for powering printed electronics,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 23, 2013, doi: 10.1063/1.4810974.
- [39] Senentxu Lanceros-Méndez and Carlos Miguel Costa, *Printed Batteries*. John Wiley & Sons, 2018.
- [40] R. Kumar, J. Shin, L. Yin, J. M. You, Y. S. Meng, and J. Wang, “All-Printed, Stretchable Zn-Ag<sub>2</sub>O Rechargeable Battery via Hyperelastic Binder for Self-Powering Wearable Electronics,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 7, no. 8, 2017, doi: 10.1002/aenm.201602096.
- [41] Z. Chu, J. Peng, and W. Jin, “Advanced nanomaterial inks for screen-printed chemical sensors,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 243, pp. 919–926, 2017, doi: 10.1016/j.snb.2016.12.022.
- [42] Y. Zhang, K. Yu, D. Jiang, Z. Zhu, H. Geng, and L. Luo, “Zinc oxide nanorod and nanowire for humidity sensor,” *Appl. Surf. Sci.*, 2005, doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.013.
- [43] B. Clifford, D. Beynon, C. Phillips, and D. Deganello, “Printed-Sensor-on-Chip devices – Aerosol jet deposition of thin film relative humidity sensors onto packaged integrated circuits,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 255, pp. 1031–1038, 2018, doi: 10.1016/j.snb.2017.08.086.
- [44] P. Kuberský, T. Syrový, A. Hamáček, S. Nešpůrek, and L. Syrová, “Towards a fully printed electrochemical NO<sub>2</sub>sensor on a flexible substrate using ionic liquid based polymer electrolyte,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 209, no. 2, pp. 1084–1090, 2015, doi: 10.1016/j.snb.2014.12.116.
- [45] P. Kuberský, T. Syrový, A. Hamacek, S. Nešpůrek, and J. Stejskal, “Printed flexible gas sensors based on organic materials,” *Procedia Eng.*, vol. 120, pp. 614–617, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.746.
- [46] L. Contat-Rodrigo, C. Pérez-Fuster, J. V. Lidón-Roger, A. Bonfiglio, and E. García-Breijo, “Screen-printed Organic Electrochemical Transistors for the detection of ascorbic acid in food,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 45, pp. 89–96, 2017, doi: 10.1016/j.orgel.2017.02.037.
- [47] G. A. Rivas *et al.*, “Carbon nanotubes-based electrochemical (bio)sensors for biomarkers,” *Appl. Mater. Today*, vol. 9, pp. 566–588, 2017, doi: 10.1016/j.apmt.2017.10.005.
- [48] “COVID-19; Pandemics; Antibody Tests; 3D Sensor; 3D Printing; Micropillar; Gold Nanoparticles; Reduced Graphene Oxide \*,” pp. 1–40, 2020.

- [49] Clare Scott, “Welsh Researchers Use Optomec Aerosol Jet Technology to 3D Print Hair-Sized Sensors | 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing,” 2015. <https://3dprint.com/106090/swansea-university-aerosol-jet/> (accessed Apr. 07, 2018).
- [50] F. L. Hammond, M. J. Smith, and R. J. Wood, “Printing Strain Gauges on Surgical Instruments for Force Measurement1,” *J. Med. Device.*, vol. 8, no. 3, p. 030935, 2014, doi: 10.1115/1.4027080.
- [51] J. Navratil, J. Reboun, T. Rericha, R. Soukup, M. Hirman, and A. Hamacek, “Nanoparticle based ink printed chip interconnections,” 2017, doi: 10.1109/ISSE.2017.8000912.
- [52] M. Hirman, J. Navratil, F. Steiner, T. Dzugan, and A. Hamacek, “Alternative technology for SMD components connection by non-conductive adhesive on a flexible substrate,” *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 30, no. 15, pp. 14214–14223, 2019, doi: 10.1007/s10854-019-01789-w.
- [53] J. Navratil, T. Rericha, V. Smitka, and A. Hamacek, “Double sided printed pattern interconnected by aerosol jet and nca technologies,” in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2019, vol. 2019-May, doi: 10.1109/ISSE.2019.8810265.
- [54] M. Edalatpour, L. Liu, A. M. Jacobi, K. F. Eid, and A. D. Sommers, “Managing water on heat transfer surfaces: A critical review of techniques to modify surface wettability for applications with condensation or evaporation,” *Appl. Energy*, vol. 222, no. May, pp. 967–992, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.178.
- [55] P. Comanns, “Passive water collection with the integument: mechanisms and their biomimetic potential,” *J. Exp. Biol.*, vol. 221, no. 10, 2018, doi: 10.1242/jeb.153130.
- [56] M. M. Hossain, D. Hegemann, A. S. Herrmann, and P. Chabreck, “Contact angle determination on plasma-treated poly(ethylene terephthalate) fabrics and foils,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 102, no. 2, pp. 1452–1458, 2006, doi: 10.1002/app.24308.
- [57] S. Nettesheim, “Evaluating the Activation Capacity of Atmospheric Plasma Systems,” Regensburg, 2016. [Online]. Available: <https://www.relyon-plasma.com/wp-content/uploads/2016/09/technical-notes-activation-capacity-of-atmospheric-plasma-systems.pdf>.
- [58] Y. F. Li, T. Shimizu, J. L. Zimmermann, and G. E. Morfill, “Cold atmospheric plasma for surface disinfection,” *Plasma Process. Polym.*, vol. 9, no. 6, pp. 585–589, 2012, doi: 10.1002/ppap.201100090.
- [59] M. J. Shenton, M. C. Lovell-Hoare, and G. C. Stevens, “Adhesion enhancement of polymer surfaces by atmospheric plasma treatment,” *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 2754–2760, 2001.
- [60] J. Navratil, T. Rericha, R. Soukup, and A. Hamacek, “Aerosol Jet Printed Sensor on Fibre for Smart and IoT Applications,” *Proc. Int. Spring Semin. Electron. Technol.*, vol. 2018-May, 2018, doi: 10.1109/ISSE.2018.8443609.
- [61] J. Štulík, “Senzory amoniaku a oxidu dusičitého na bázi modifikovaných uhlíkových nanotrubic,” Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [62] J. Wang, W. Zhang, R. Cao, X. You, and H. Lai, “Analysis of Nitrogen Dioxide in Environment,” *Adv. Biosci. Biotechnol.*, vol. 07, no. 06, pp. 278–288, 2016, doi: 10.4236/abb.2016.76026.
- [63] W. J. Gauderman *et al.*, “Childhood asthma and exposure to traffic and nitrogen dioxide,” *Epidemiology*, vol. 16, no. 6, pp. 737–743, 2005, doi: 10.1097/01.ede.0000181308.51440.75.
- [64] DD Scientific, “DD Scientific,” 2020. <http://www.ddscientific.com/no2->

- sensors.html.
- [65] M. W. F. and V. P. Michael T. Carter, Joseph R. Stetter, “Amperometric Gas Sensors with Ionic Liquid Electrolytes,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [66] P. Kuberský, A. Hamáček, S. Nespůrek, R. Soukup, and R. Vik, “Effect of the geometry of a working electrode on the behavior of a planar amperometric NO<sub>2</sub> sensor based on solid polymer electrolyte,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 187, pp. 546–552, 2013, doi: 10.1016/j.snb.2013.03.081.
- [67] Z. Hoherčáková and F. Opekar, “Au/PVC composite - A new material for solid-state gas sensors: Detection of nitrogen dioxide in the air,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 97, no. 2–3, pp. 379–386, 2004, doi: 10.1016/j.snb.2003.09.016.
- [68] P. Sedlák, P. Kuberský, and F. Mívalt, “Effect of various flow rate on current fluctuations of amperometric gas sensors,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 283, no. December 2018, pp. 321–328, 2019, doi: 10.1016/j.snb.2018.12.006.
- [69] C. García-Salinas, P. A. Ramos-Parra, and R. I. Díaz de la Garza, “Ethylene treatment induces changes in folate profiles in climacteric fruit during postharvest ripening,” *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 118, pp. 43–50, 2016, doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.03.011.
- [70] J. C. Pech, M. Bouzayen, and A. Latché, “Climacteric fruit ripening: Ethylene-dependent and independent regulation of ripening pathways in melon fruit,” *Plant Sci.*, vol. 175, no. 1–2, pp. 114–120, 2008, doi: 10.1016/j.plantsci.2008.01.003.
- [71] M. Luo *et al.*, “A paper-based plasma-assisted cataluminescence sensor for ethylene detection,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 240, pp. 132–141, 2017, doi: 10.1016/j.snb.2016.08.156.
- [72] E. E. Goldschmidt, “Ripening of citrus and other non-climacteric fruits: A role for ethylene,” *Acta Horticulturae*, vol. 463, pp. 335–340, 1998, doi: 10.17660/ActaHortic.1998.463.42.
- [73] M. A. G. Zevenbergen, D. Wouters, V. A. T. Dam, S. H. Brongersma, and M. Crego-Calama, “Electrochemical sensing of ethylene employing a thin ionic-liquid layer,” *Anal. Chem.*, vol. 83, no. 16, pp. 6300–6307, 2011, doi: 10.1021/ac2009756.

## Seznam publikací a výstupů studenta vztahující se k předmětu disertační práce

### Publikace v časopisech s impakt faktorem

- [A1] FESSL, J. MACH, F. NAVRÁTIL, Design, fabrication and testing of electroadhesive interdigital electrodes. *Open Physics*, 2018, roč. 16, č. 1, s. 430-434. ISSN: 2391-5471
- [A2] KUBERSKÝ, P. NAVRÁTIL, J. SEDLÁK, P. SYROVÝ, T. NEŠPŮREK, S. HAMÁČEK, A. An electrochemical amperometric ethylenes sensor with solid polymer electrolyte based on ionic liquid. *SENSORS*, 2021, roč. 21, č. 3, s. 1-14. ISSN: 1424-8220

### Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [A3] PRETL, S. MRAČEK, L. NAVRÁTIL, ŘEŘICHA, T. HAMÁČEK, A. Low-voltage electrochemical transistor based on ionic liquid-gated PEDOT:PSS with copper electrodes. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 58-61. ISBN: 978-1-5090-1389-0
- [A4] NAVRÁTIL, HAMÁČEK, A. ŘEBOUN, J. SOUKUP, R. Perspective methods of creating conductive paths by aerosol jet printing technology. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 36-39. ISBN: 978-1-4799-8860-0 , ISSN: 2161-2528
- [A5] NAVRÁTIL, ŘEBOUN, J. ŘEŘICHA, T. SOUKUP, R. Aerosol Jet® SMD component bonding. In *ISSE 2016 : 39th International Spring Seminar of Electronics Technology : Book of Abstracts*. Pilsen: University of West Bohemia in Pilsen, 2016. s. 87-88. ISBN: 978-80-261-0618-0
- [A6] CALTA, P. NAVRÁTIL, J. ŠUTTA, P. NETRVALOVÁ, M. VAVRUŇKOVÁ, V. MEDLÍN, R. *A comparative study on p-type windows for thin film silicon solar cells grown by PECVD*. Acropolis Congress Centre, Nice, France, 2019.
- [A7] NAVRÁTIL, ŘEBOUN, J. ŘEŘICHA, T. SOUKUP, R. HIRMAN, M. HAMÁČEK, A. Nanoparticle based ink printed chip interconnections. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-0582-0
- [A8] NAVRÁTIL, J. ŘEŘICHA, T. SMÍTKA, V. HAMÁČEK, A. Double sided printed pattern interconnected by Aerosol Jet and NCA technologies. In *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2019) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2019. s. 1-4. ISBN: 978-1-7281-1874-1 , ISSN: 2161-2528
- [A9] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, SOUKUP, R. HAMÁČEK, A. STEINER, F. Influence of flexible substrate roughness with Aerosol Jet printed pads on the mechanical shear strength of glued joints. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-6. ISBN: 978-1-5386-0582-0
- [A10] NAVRÁTIL, ŘEŘICHA, T. SOUKUP, R. HAMÁČEK, A. Aerosol Jet printed sensor on fibre for smart and IoT applications. In *2018 41st International Spring*

- Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-5731-7 , ISSN: 2161-2528
- [A11] FESSL, J. MACH, F. NAVRÁTIL, Numerical and experimental analysis of electrostatic adhesion force generated by interdigital electrodes. In *18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF 2017) : Book of Abstracts*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-2. ISBN: 978-1-5386-1661-1
- [A12] PAVEC, M. NAVRÁTIL, J. SOUKUP, R. SMÍTKA, V. HAMÁČEK, A. Fully printed IoT antenna for drone-deployed autonomous sensor unit. In *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2019) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2019. s. 1-4. ISBN: 978-1-7281-1874-1 , ISSN: 2161-2528
- [A13] ŘEBOUN, J. PRETL, S. NAVRÁTIL, HLÍNA, J. Bending endurance of printed conductive patterns on flexible substrates. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 184-188. ISBN: 978-1-5090-1389-0
- [A14] SOUKUP, R. NAVRÁTIL, ŘEBOUN, J. ŘEŘICHA, T. A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique. In *Proceedings of the 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2015)*. Piscataway: IEEE, 2015. s. 30-35. ISBN: 978-1-4799-8860-0 , ISSN: 2161-2528
- [A15] NAVRÁTIL, J. KUBERSKÝ, P. SEDLÁK, P. HAMÁČEK, A. Preparation of nitrogen dioxide sensor utilizing aerosol Jet Printing technology. In *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2020*. Piscataway: IEEE, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-1-72816-773-2 , ISSN: 2161-2528
- [A16] PAVEC, M. NAVRÁTIL, SOUKUP, R. HAMÁČEK, A. A bowtie antenna prepared by Aerosol Jet and embroidering technology. In *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-5731-7 , ISSN: 2161-2528
- [A17] NAVRÁTIL, PAVEC, M. ŘEBOUN, J. ŘEŘICHA, T. HAMÁČEK, A. Aerosol Jet silver printed lines on subsequently bent glass substrates. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-0582-0

## Publikace ve sbornících doktorandských konferencí

- [A18] NAVRÁTIL, Možnosti systému Aerosol Jet®. In *Elektrotechnika a informatika 2015. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. 87-90. ISBN: 978-80-261-0514-5
- [A19] NAVRÁTIL, Aerosol Jet® bondování SMD součástek. In *Elektrotechnika a informatika 2016. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 55-58. ISBN: 978-80-261-0516-9

## Patent

- [A20] ŘEBOUN, J. HAMÁČEK, A. SOUKUP, R. HLÍNA, J. PRETL, S. VIK, R. NAVRÁTIL, J. *Způsob výroby rezistoru pro výkonové aplikace*. Číslo patentu CZ 308757 B6, Praha, 2021.

## Ostatní publikace a výstupy studenta

### Publikace v časopisech s impakt faktorem

- [B1] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. DŽUGAN, T. HAMÁČEK, A. Alternative technology for SMD components connection by non-conductive adhesive on a flexible substrate. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, roč. 30, č. 15, s. 14214-14223. ISSN: 0957-4522

### Publikace v časopisech indexovaných v databázi SCOPUS

- [B2] BENEŠOVÁ, A. HIRMAN, M. NAVRÁTIL, ŠIMOTA, J. TUPA, J. STEINER, F. Methodologies to improve experimental research processes in soldering technology. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2016, roč. 60, č. 4, s. 237-244. ISSN: 2064-5260

### Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [B3] PAVEC, M. BYSTRICKÝ, T. MORAVCOVÁ, D. ŘEBOUN, J. SOUKUP, R. NAVRÁTIL, HAMÁČEK, A. A comparison of embroidered and screen-printed ultra-wideband antennas. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2017)*. Piscataway: IEEE, 2017. s. 1-4. ISBN: 978-1-5386-0582-0
- [B4] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Reliability of glued joints on flexible substrates during accelerated current ageing. In *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2019) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2019. s. 1-7. ISBN: 978-1-7281-1874-1 , ISSN: 2161-2528
- [B5] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Comparison of conductive ribbons reliability during electrical current ageing. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics) : CDEE 2020*. Pilsen: University of West Bohemia in Pilsen, 2020. s. 82-86. ISBN: 978-1-72815-879-2 , ISSN: 2464-7071
- [B6] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, STEINER, F. DŽUGAN, T. HAMÁČEK, A. SMD components assembly on a flexible substrate by non-conductive adhesives. In *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2018) : /proceedings/*. Piscataway: IEEE, 2018. s. 1-6. ISBN: 978-1-5386-5731-7 , ISSN: 2161-2528
- [B7] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. HAMÁČEK, A. STEINER, F. Mechanical testing of joints glued/soldered on textile ribbons. In *Abstracts Proceedings : International Flash Conference IMAPS : Czech and Slovak Chapter*. Brno: Novpress s.r.o., 2020. s. 42-43. ISBN: 978-80-214-5902-1
- [B8] HIRMAN, M. STEINER, F. NAVRÁTIL, J. HAMÁČEK, A. Comparison of QFN chips glued by ACA and NCA adhesives on the flexible substrate. In *Proceedings of the 22nd Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2019)*. Piscataway: IEEE, 2019. s. 1-7. ISBN: 978-0-9568086-6-0

- [B9] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Reliability of glued SMD components on smart textile. In *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2020*. Piscaway: IEEE, 2020. s. 1-6. ISBN: 978-1-72816-773-2
- [B10] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Effect of washing cycles on glued conductive joints used on stretchable smart textile ribbons. In *2020 8th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC 2020) : proceedings*. Piscataway: IEEE, 2020. s. 1-4. ISBN: 978-1-72816-293-5
- [B11] BENEŠOVÁ, A. ŠIMOTA, J. HIRMAN, M. NAVRÁTIL, TUPA, J. STEINER, F. Connection technologies quality improving. In *Proceedings of the International Spring Seminar of Electronics Technology (ISSE 2016)*. Piscataway: IEEE, 2016. s. 342-347. ISBN: 978-1-5090-1389-0
- [B12] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Electrical resistance of solder joints on conductive ribbons. In *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2020*. Piscaway: IEEE, 2020. s. 1-5. ISBN: 978-1-72816-773-2
- [B13] HIRMAN, M. NAVRÁTIL, J. STEINER, F. HAMÁČEK, A. Reliability testing of QFN chips connected by non-conductive adhesive on PET foil with silver pattern. In *Abstracts Proceedings : International Flash Conference IMAPS : Czech and Slovak Chapter*. Brno: Novpress s.r.o., 2018. s. 54-55. ISBN: 978-80-214-5680-8

### Publikace ve sbornících doktorandských konferencí

- [B14] NAVRÁTIL, Porovnání laseru a mechanického odvrtávání pro použití odvrtávací metody zjišťování zbytkových napětí. In *Elektrotechnika a informatika 2014. Část 1., Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. s. 85-86. ISBN: 978-80-261-0367-7
- [B15] NAVRÁTIL, HIRMAN, M. Kontaktování SMD součástek na flexibilní DPS s pomocí nevodivých lepidel. In *Elektrotechnika a informatika 2018. Elektrotechnika, elektronika, elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018. s. 97-100. ISBN: 978-80-261-0785-9

### Funkční vzorek

- [B16] ŘEBOUN, J. SOUKUP, R. BLECHA, T. KAŠPAR, P. HAMÁČEK, A. NAVRÁTIL, LOUKOTA, P. KOŽELUH, J. *Tisňové tlačítko ve formě textilního pásku*. Evidenční číslo: 22190–FV028–2016, 2016.