

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta elektrotechnická

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2017**

**Vojtěch Povolný**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**

## **Příprava organických a tištěných elektronických součástek**

### **Preparation of organic and printed electronic devices**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Studijní obor: Síťové a informační technologie

Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposá

**Vojtěch POVOLNÝ**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **P o v o l n ý V o j t ě c h**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika  
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **Příprava organických a tištěných elektronických součástek**

### ***Pokyny pro vypracování:***

- 1) Provedte rešerši na téma organické a tištěné elektronické součástky a struktury. Popište současný stav vývoje v této oblasti s ohledem na používané technologie a cílové aplikace.
- 2) Připravte vybrané tištěné elektronické součástky.
- 3) Charakterizujte základní optické a elektrické vlastnosti realizovaných elektronických struktur.
- 4) Na základě výsledků charakterizace optimalizujte způsob přípravy jednotlivých elektronických součástek.
- 5) Připravte a charakterizujte tištěnou strukturu vhodnou pro konkrétní aplikaci v organické a tištěné elektronice.
- 6) Zhodnoťte dosažené výsledky, proveďte jejich srovnání a navrhnete další postup.

### ***Seznam odborné literatury:***

- [1]. Hutchings I.M., Martin G.D.: Inkjet Technology for Digital Fabrication, ISBN: 978-0-470-68198-5, Wiley 2012.
- [2]. Klauk, H. Organic Electronics II: More Materials and Applications, ISBN 978-3527326471, Wiley 2012
- [3]. Saganuma, K. Introduction to Printed Electronics, ISBN 978-1461496250, Springer 2014.
- [4]. Fujifilm Dimatix Material Printer DMP 2800 Series User Manual.
- [5]. Záveský M. Příprava a charakterizace tištěných elektronických struktur, diplomová práce, FEL ČVUT 2016.

Platnost zadání : do konce letního semestru 2016/2017  
Z. S.

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 1 2017

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Dne 10. 1. 1017

.....

Vojtěch Povolný

## **Poděkování:**

Děkuji svému vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Alexandru Laposovi, který mi věnoval mnoho svého času na konzultace a odbornou pomoc při realizaci praktické části. Velké díky patří také Ing. Josefu Náhlíkovi za pomoc při charakterizaci vzorků. Poděkovat musím také své rodině, která mě vždy podporovala a stála při mně.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá přípravou elektronických struktur pomocí materiálového Inkjet tisku a charakterizací těchto struktur.

V teoretické části jsou nejprve uvedeny aplikace, kde lze Inkjet technologii využít, dále pak je popsán princip nanášení materiálu metodou Inkjet a tiskárna, která byla použita pro tisk struktur v této práci.

Praktická část se zabývá tiskem základních elektronických součástí na různé substráty a jejich následnou charakterizací. Dále jsou uvedeny návrhy pro zlepšení kvality tisku a čištění substrátů a návrhy dalších aplikací, které lze realizovat s pomocí dosažených výsledků této práce.

## **Klíčová slova**

Inkjet, inkoustový tisk, tištěná elektronika, Dimatix, Interdigitální struktury

## **Annotation**

This work deals with the preparation of electronic structures using fiber Inkjet printing and the characterization of these structures.

In the theoretical part are first listed applications, where you can take advantage of Inkjet technology, then describes the principle of applying material by the method of Inkjet and printer that was used for printing structures in this work.

The practical part is concerned with basic electronic components printing on various substrates and their characterization. The following are suggestions for improving print quality and cleaning of substrates, and suggestions for other applications that can be implemented with the help of the results obtained in this work.

## **Key words**

Inkjet printing, Printed electronics, Dimatix, Interdigital structures

1	Úvod .....	1
1.1	Cíle práce: .....	2
1.2	Tištěná elektronika .....	3
1.3	Aplikace .....	5
1.4	Techniky tisku .....	9
1.5	Současný stav vývoje tištěných organických inkjet prvků a obvodů .....	10
2	Nanášení funkčních materiálů metodou InkJet .....	13
2.1	Technologie InkJet .....	13
2.2	Inkjet tisk elektronických aplikací .....	14
2.3	Tiskárna Inkjet .....	15
2.4	Sintrování .....	16
3	Vývoj základních elektronických prvků .....	19
3.1	Měření plošné rezistivity .....	19
3.2	Rezistory .....	21
3.3	Kapacitory .....	24
4	Praktická část .....	27
4.1	Příprava před tiskem .....	28
4.2	Výběr inkoustu a substrátu .....	32
4.3	Měření rozměru natištěných struktur .....	35
4.4	Měření elektrických vlastností struktur .....	35
4.5	Realizované struktury .....	37
4.6	Další navržené struktury .....	47
5	Srovnání výsledků, návrh dalšího postupu .....	51
5.1	Zhodnocení dosažených výsledků a jejich porovnání s již dostupnými .....	51
5.2	Navržení dalšího postupu .....	53
6	Závěr .....	55
7	Použitá literatura a zdroje .....	57
8	Seznam příloh	
	A) Vybavení laboratoře	
	B) Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami	
	C) Struktury tištěné až 5 vrstvami	
	D) Ukázky realizovaných struktur	

## Seznam použitých zkratek a pojmů

Zkratka	Význam
<b>RFID</b>	Radio-frequency identification [identifikace na rádiové frekvenci]
<b>USD</b>	United States Dollar [Amercký dolar]
<b>AMTFT</b>	Active Matrix Thin Film Transistor [Aktivní matice tenkovrstvých tranzistorů]
<b>RF</b>	Rádio frekvenční
<b>OLED</b>	Organic Light Emitting Diode
<b>OE-A</b>	Organic Electronics Association
<b>VF</b>	Vysokofrekvenční
<b>NF</b>	Nízkofrekvenční
<b>OTFT</b>	Organic Thin Film Transistors
<b>BioFET</b>	Field effect transistor based biosensor
<b>AMOLED</b>	(active-matrix organic light-emitting diode
<b>EPD</b>	Electrophoretic displays
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Displays
<b>TFT</b>	Thin Film Transistors
<b>AMEPD</b>	Active Matrix Electrophoretic Display
<b>DOD</b>	Drop-On-Demand
<b>MIM</b>	Metal-Insulator-Metal
<b>PEDOT:PSS</b>	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)
<b>TGME</b>	Triethylene glycol monomethyl ether



# Seznam použitých obrázků

Obr. 1 RFID štítek s čtečkou, převzato z [10].....	6
Obr. 2 A) Schéma součástí tranzistoru BioFET; B) Horní a boční pohled znázorňující jednotlivé vrstvy BioFETu s ukázkou zařízení natištěném na flexibilním substrátu, převzato z .....	7
Obr. 3 Schéma AMOLED displeje, převzato z [40].....	8
Obr. 4 Rozlišení a propustnost materiálových deposičních systémů, převzato z [17] .....	9
Obr. 5 Metoda deposičního systému Roll-to-roll .....	10
Obr. 6 Tiskárna Dimatix DMP-2831 .....	15
Obr. 7 Detailní pohled na změny při sintrování. Jednotlivé částice se vlivem tepla spojí v jeden celek, převzato z [31].....	16
Obr. 8 Schématický obrázek procesu sintrování nanočásticového inkoustu: A) Stav před zahřátím; B) Stav po odpaření rozpouštědla; C) Začátek sintrování; D) Po dokončení sintrování; upraveno z [32].	17
Obr. 9 Zařízení pro sintrování metodou Pulse forge, dostupné z [33] .....	17
Obr. 10 Motiv pro měření plošného odporu Van der Pauw, převzato z [35] .....	20
Obr. 11 Ukázka natištěných rezistorů, převzato z [17] .....	21
Obr. 12 Závislost plošného odporu na teplotě, upraveno z [17].....	23
Obr. 13 Molekulární struktura PEDOT:PSS [41] .....	24
Obr. 14 Příčný řez nanášených vrstev kapacitoru .....	25
Obr. 15 Inkjet tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831 .....	27
Obr. 16 Cartridge pro materiálovou tiskárnu, upraveno z [36].....	28
Obr. 17 Příklady tvarů vylétávající kapky: a) Satelitní kapky, b) Dlouhý krček, c) Ideální tvar kapky ...	30
Obr. 18 Okno Drop Watcher pro sledování kapek vyletujících z trysek.....	31
Obr. 19 Nastavení napěťového průběhu pro aktivaci trysek .....	31
Obr. 20 Podrobné nastavení inkoustu: a) Velikost napětí na jednotlivých tryskách; b) Teplota, Počet použitých trysek a výška cartridge, ve které bude tisknout; c) Typ a četnost čištění cartridge.....	32
Obr. 21 Měření rozměrů natištěného layoutu pomocí kamery tiskárny: a) software pro ovládání kamery s uvedeným rozlišením, b) Příklad naměřené struktury .....	35
Obr. 22 Ukázka softwaru použitého pro měření plošného odporu .....	36
Obr. 23 Měřicí hrotová stanice.....	36
Obr. 24 Ukázka softwaru použitého pro měření odporu struktur rezistorů .....	37
Obr. 25 Struktury pro měření plošného odporu inkoustu .....	37
Obr. 26 Rozměry motivu Van der Pauw .....	38
Obr. 27 Detaily natištěné struktury zachycené fiducial kamerou .....	38
Obr. 28 Hodnoty plošného odporu jednotlivých vzorků .....	39
Obr. 29 Průměrná hodnota odporu podle počtu vrstev .....	40
Obr. 30 Sada struktur rezistorů s označením délky, šířky odporové části a předpokládaného odporu	41
Obr. 31 Navržené struktury s různou hodnotou elektrického odporu.....	42
Obr. 32 Lineární odpory sada I .....	43
Obr. 33 Lineární odpory sada II .....	43
Obr. 34 Lineární odpory sada III .....	44
Obr. 35 Návrhy layoutů senzoru výšky hladiny .....	48
Obr. 36 Příklad poruchy tisku NFC antény .....	48
Obr. 37 Layout NFC antény .....	48
Obr. 38 Motiv tištěných induktorů.....	49

Obr. 39 Snímek induktorů pořízený kamerou tiskárny .....	49
Obr. 40 Deskový kapacitor .....	50
Obr. 41 Příklad rozlévání inkoustu na skleněném substrátu.....	52
Obr. 42 a) Závislost frekvence tryskání a vzdálenosti kapek; b) Jednotvá plocha inkoustu - sklo; c) Efekt skládaných mincí - PET .....	52

## Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Technické informace o tiskárně.....	27
Tab. 2 Vlastnosti cartridge.....	28
Tab. 3 Porovnávané faktory u fotopapírů .....	34
Tab. 4 Stav fotopapírů po teplotním namáhání .....	34
Tab. 5 Přehled vlastností dostupných inkoustů .....	34
Tab. 6 Informace o použitých substrátech .....	34
Tab. 7 Výsledky měření plošného odporu ( $\Omega/\square$ ) na fotopapíru.....	39
Tab. 9 Rozměry tištěných rezistorů .....	41
Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot odporu ( $\Omega$ ) sady I.....	42
Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot odporu ( $\Omega$ ) sady II.....	43
Tab. 12 Tabulka naměřených hodnot odporu ( $\Omega$ ) sady III.....	44
Tab. 13 Hodnoty odporu ( $\Omega$ ) natištěných rezistorů rozdělených podle čísla vzorku a motivu .....	45
Tab. 14 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady I dle počtu vrstev.....	45
Tab. 15 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady II dle počtu vrstev.....	45
Tab. 16 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady II dle počtu vrstev.....	45
Tab. 17 Rozměry tištěných kapacitorů .....	46
Tab. 18 Rozměry navržených senzorů výšky hladiny .....	47

# 1 Úvod

Elektronika postupem času změnila naše životy. Stalo se tak díky obrovským výhodám technologie mikroelektroniky, ve které miniaturizované integrované obvody, skládající se z milionů tranzistorů, umožnily integraci výpočetní techniky, bezdrátové komunikace, polohovacích systémů a ostatních funkcí do malých zařízení. Například zprávy, předpověď počasí, mapy, navigace reklama a ostatní, to jsou služby, které jsou dnes běžně dostupné v mobilních telefonech.

V budoucnosti by mohly být některé tištěné aplikace nahrazeny jejich elektronickými variantami. Jako příklad může posloužit čárový kód, který má být nahrazen RFID (zkratka z ang. Radio-frequency identification) štítky. Dále můžeme jmenovat knížky v tradiční tištěné formě, které jsou nahrazovány jejich elektronickou verzí - e-knihy.

Rozšíření RFID štítků má zjednodušit kontrolu nad zbožím pro obchodníky a také významně zrychlit nakupování v obchodech [1]. Ale aby se RFID technologie plně rozvinula a nahradila čárové kódy, musí se pohybovat s cenou v rozmezí okolo 0,01 USD (z ang. United States Dollar), aby tak byla levnější než čárový kód a byla proto více využívána. Dosažení tohoto cíle je ale velice náročné, protože cena elektronických zařízení klesá se zvyšující se hustotou integrovaných obvodů na křemíkové destičce. Avšak cena křemíku na jednotku plochy zůstává vysoká. A to i přesto, že se používá hybridních postupů, kdy se například kombinuje natištěná anténa spojená s velmi malým křemíkovým čipem. Protože často nelze snížit cenu propojení těchto součástí, zůstává cena vysoká[2].

V dalším příkladu můžeme zmínit e-knihy s velkým, tenkým displejem. Ty mohou nahradit celou sbírku knih a dodat interaktivní a pohodlný čtenářský požitek. Aby byly tradiční knihy nahrazeny elektronickými, musí cena elektronických knih být nižší, než cena tištěných knih.

K řízení jednotlivých pixelů se používá pole AMTFT (zkratka z ang. Active Matrix Thin Film Transistor), které se nachází na zadní straně displejů. Vyrábí se litografickou a vakuovou metodou, což je proces s vysokými náklady. Teploty používané při konvenčním způsobu výroby displejů jsou příliš vysoké pro použití plastových substrátů, které jsou ale vyžadovány pro realizaci ohebných displejů. Cena tak nadále zůstává u displejů hlavní překážkou.

Vzrůstá tak poptávka po technologii, která by byla finančně nenáročná na výrobu a dosáhla velkého počtu vyrobených kusů za krátký čas, a která by vyplnila cenové a technologické mezery spojené s běžnými mikroelektronickými procesy. Tištěná elektronika se zdá být nejvhodnější technologií, která by mohla snížit náklady na výrobu.

Pomocí materiálového tisku je dnes nanášeno čím dál větší množství materiálů, kde se stále zvětšuje podíl organických materiálů.

Za tímto účelem byla na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT v Praze zřízena laboratoř nanolitografie za účelem výzkumu tištěné a organické elektroniky, která je vybavena deposičním inkjetovým systémem (materiálovou tiskárnou) Fujifilm Dimatix DMP 2831.

## 1.1 CÍLE PRÁCE:

- Seznámit se s principy činnosti a způsoby realizace nanášení materiálu metodou Inkjet, zejména se pak zaměřit na technologie dostupné na katedře. Tomuto tématu je věnována kapitola 2.
- Uvést možnosti využití dostupné technologie – uvést příklady realizace možných součástí a popsat jejich charakterizaci. Tomu se věnuje kapitola 3.
- Popsat procedury nutné před zahájením tisku, vytvořit vhodné layouty, optimalizovat podmínky pro tisk a vytisknout navržené motivy. Dále u vytištěných motivů provést charakterizaci elektrických vlastností. Těmto tématům je věnována kapitola 4. Na základě získaných poznatků z této kapitoly byly ještě navrženy další možné aplikace s využitím vlastností tištěných struktur.
- Zhodnotit dosažené výsledky, provést srovnání a navrhnout další postup. Tato témata jsou uvedena v kapitole 5.

## 1.2 TIŠTĚNÁ ELEKTRONIKA

Tisková technika se stala nedílnou součástí dnešní elektroniky, nicméně její vývoj potrvá ještě mnoho let. V posledních letech se objevily nové koncepty pod různými názvy: „plastic electronics“, „large area electronics“, organická elektronika, tištěná elektronika, ohebná elektronika,... aby ukázaly nové směry v elektronice, související s novými materiály, novými elektronickými prvky, novými funkcemi a novými technologiemi výroby ukazující na revoluci v mikroelektronice, zaměřenou hlavně na křemíkovou a litografickou techniku. Tištěná elektronika je používána k nanesení funkčních materiálů na ohebné substráty a k vytvoření elektronických systémů využívajících součástky jako rezistory, kapacitory a tranzistory.[3][4]

Výroba integrovaných obvodů běžně obnáší sérii kroků nanášení tenkých vrstev využívajících vakuové procesy spolu s procesy litografickými, které zahrnují nanášení fotorezistivního materiálu metodou spin-coating, (tedy nanášení tenké vrstvy materiálu pomocí rotačního zařízení), expozici, vývoj, leptání a odstranění fotorezistu, abychom dostali požadovaný motiv nanesených tenkých vrstev. Tato metoda vyžaduje několik vzorových masek, řadu procesů a také s sebou nese velké ztráty materiálu, zvyšující výslednou cenu procesu. Naproti tomu, tištěná elektronika využívá metody jako InkJet, hlubotisk nebo ofsetový tisk. Jde o technologie, kdy se nanáší materiál pouze tam, kde je vyžadován a nedochází tak k jeho zbytečným ztrátám. V minulých dvou desetiletích bylo vynaloženo velké úsilí k nahrazení anorganických polovodičů (křemík, galium arsenid, atd.), izolantu oxidu křemičitého a také kovů jako hliníku a mědi organickou elektronikou. Snaha byla zaměřena především na vylepšení elektrických vlastností a stability. V porovnání s běžnými polovodiči, jako jsou křemíkové polovodiče, které jsou cenově náročné na výrobu, mohou být organické polovodiče vyrobeny s nízkými náklady.

Mimo to, tištěná elektronika může začít využívat vysoce výkonných nástrojů a vyspělé tiskové technologie využívané v tiskovém průmyslu, jako třeba offset, gumotisk, inkjet, aj. Tisk metodou roll-to-roll umožňuje tisknout až několik metrů za minutu. To je rychlost schopná konkurovat paralelnímu vakuovému deposičnímu procesu [4]. Navíc tato metoda umožňuje použít jako substrát ohebné fólie nebo papír, což je mnohem levnější varianta oproti křemíkové destičce nebo sklu.

Výzkum nových materiálů se stal klíčovou výzvou pro mnoho společností zabývajících se chemickým a materiálovým inženýrstvím. Několik universit a velkých firem jako Henkel, Basf, DuPont a Merck kromě ostatních vyvíjejí nové materiály, jako jsou vodiče, izolanty a polovodiče vhodné pro nové výrobní procesy. Jedním z úskalí, kterým je třeba se zabývat, je nezbytná nízkoteplotní výroba i pro typické plastové substráty, které přecházejí do skelného stavu v teplotách okolo 150 – 200 °C. Při další manipulaci může docházet k narušení natisknutých prvků.[5] Naštěstí, vývoj inkoustů byl v několika minulých letech úspěšný a umožňuje tak vytvrzování a sintrování polovodičů, respektive kovových nanočástic za nízkých teplot. [6][7]

### 1.2.1 Výhody technologie

Tištěná elektronika umožňuje výrobu mikro- a optoelektronických obvodů s použitím tiskových metod, proto by bylo dobré zmínit několik hlavních výhod:

1. **Vhodný způsob pro nanášení elektronických součástek na ohebné substráty.** Příkladem mohou být ohebné zobrazovací jednotky u chytrých telefonů nebo chytrých textilií.

2. **Umožňuje úplnou integraci systému.** Metodou tisku by mohly být vyrobeny součásti jako baterie, zobrazovací jednotky, paměť aj.
3. **Integrační proces.** Umožňuje elektronice být snadno integrovaná k ostatním tisknutým mediím díky tomu, že se bude tisknout na stejné lince. To zjednoduší evidování produktů, jako to umožňují RFID štítky.
4. **Tisk může být mnohem rychlejší než běžná výroba.** Podle odhadu by mohl být rozdíl v rychlosti výroby jedné součástky rychlejší až o 4 řády.
5. **Velkoplošná výroba.** Umožňuje tisk elektroniky na velkých plochách a nemusí se omezovat na rozměry destiček plošných spojů. Je tak blíže výrobě zobrazovacích jednotek.
6. **Přátelský k životnímu prostředí.** Organické materiály využívají více efektivní tiskový proces z hlediska nižší spotřeby energie. Dále využívají selektivní depoziční proces zlepšující dopad elektronického průmyslu na životní prostředí.
7. **Bio – kompatibilita.** Použitím organických materiálů v biomedicině se může například zlepšit přijetí implantátu lidským tělem.
8. **Tisk má menší investiční náklady než ostatní způsoby výroby.** Odhaduje se, že místo na výrobu pomocí tištěné elektroniky bude stát 3 miliony USD, oproti 30 milionům na továrnu vyrábějící elektroniku běžným způsobem. [8]

### 1.2.2 Současné výzvy a trendy

V následujících několika bodech jsou shrnuty výzvy a cíle, které je vhodné zmínit:

1. Kvalita tisku: U běžného tisku se obvykle zabýváme makroskopickými rozměry (barva, viditelná ostrost, atd.), zatímco tištěná elektronika přináší nový pohled na věc. Zde je třeba se zabývat věcmi jako bodová morfologie, plynulost čáry, mikroskopické vady natištěných vrstev, rozpoznání vrstev.
2. Substráty: Mezi substráty pro tištěnou elektroniku budou pravděpodobně dále dominovat plasty a sklo díky jejich rozměrové a teplotní stabilitě. Pro „chytré balení“ a jiné aplikace je papír také potenciálně použitelný materiál.
3. Tiskové metody: Každá z analogových/spojitých tiskových technologií (sítotisk, gumotisk, hlubotisk,...) byla nebo stále je používána k vytváření elektronických obvodů. Konvenční tiskové systémy jako gumotisk, ofsetový tisk nebo hlubotisk jsou vhodné k masové produkci a to bude pravděpodobně pokračovat i u tištěné elektroniky. Sítotisk má také svůj význam a je využívána pro výrobu některé komerční elektroniky jako jsou radiofrekvenční antény nebo elektroluminiscenční displeje. Současně je zde mnoho zájmů v digitálním způsobu tisku, který může být definován jako tisk využívající digitální soubor jako vstup informací k tisku, který eliminuje potřebu použití masek nebo vzorovaných struktur. Technické vlastnosti technologie Inkjet tisku dělají tento způsob vhodným pro širokou možnost přizpůsobení, malosériovou výrobu a snadnou tvorbu obvodů. Inkjet přichází s možností dokonalejší technologie pro výrobu tištěné elektroniky na zakázku díky jednoduchosti úpravy vzoru a rychlému testu návrhu. Volba tiskové technologie bude stanovena parametry jako délka tisku, velikost prvku, variabilní požadavky na data. Ačkoli se stále zlepšují možnosti použití menších vzorů, rozlišení, evidence, jednotvárnost a charakterizace

výrobního procesu jsou stále klíčovým úkolem. Plánuje se, že by technologie tisku mohla být používána v podmínkách podobných průmyslové výrobě (až 10 000ks).

4. Vlastnosti inkoustu: V posledních letech byl veden intenzivní výzkum zlepšující vlastnosti materiálů organických polovodičů, jako strategický bod k vývoji více komplexních systémů. Momentálně polovodiče typu N dosahují mobility a stability polovodičů typu P, umožňující použití doplňkové logiky. Navíc vodivé a nevodivé inkousty přilákaly mnoho pozornosti vývojem aktivních prvků

Souvislost mezi materiály a procesem tisku je rozhodující pro technologický úspěch. Fyzikální a chemické vlastnosti inkoustu musí přesně souhlasit se specifikací tiskárny. Konkrétně upravený inkoust není možné použít pro dvě různé technologie tisku. Rozpoznání vrstev v různých tiskových vrstvách je náročný úkol, který správnými zásadami návrhu designu, opakovatelností a stabilitou výroby přímo ovlivňuje výkon zařízení.

Metodologie návrhu přímo závisí na technologickém vývoji. Ačkoliv bude návrh designu obvodů využívat znalostí křemíkové technologie, bude vyžadována adaptace na limity nové technologie tisku a vývoj materiálů.

### 1.2.3 Shrnutí

S výhodami, které byly zmíněny výše, se Organická elektronika stala vhodnou technologií k realizaci nízkonákladových aplikací s možností výroby velkého množství jako levné RFID štítky, ohebné displeje a osvětlení, pružné solární panely, jednorázová diagnostická zařízení nebo hry, tištěné baterie aj. Nižší výkon a nižší integrační hustota jsou hlavními nevýhodami, ale nižší náklady na výrobu dovolují velkou možnost přizpůsobení běhu výroby a malosériová usnadňuje výrobu jednorázové elektroniky.

## 1.3 APLIKACE

Na poli organických materiálů bylo vyvinuto mnoho prvků. Jmenujme například fotovoltaická zařízení, ohebné displeje (OLED – z ang. Organic Light-emitting diode), osvětlení (to jak u OLED, tak fotoluminiscenční prvky), elektronika a komponenty (jako jsou RFID, paměti, baterie a ostatní) a integrované chytré systémy (chytré textilie a jiné objekty).

### 1.3.1 RFID

Očekává se, že RFID systém by mohl plně nahradit čárové kódy na jednotlivém spotřebitelském nebo průmyslovém zboží a tím urychlit a zjednodušit evidenci zboží. Navíc by tyto štítky mohly být potenciálně integrovány spolu se senzory a malými displeji, na kterém by se zobrazovaly informace o produktu, například datum spotřeby. Velké množství ekonomických analýz se shoduje, že cena těchto štítků bude muset být nižší než 0,01 USD, aby se staly běžně používanými a ekonomicky udržitelné. Minimální cena takto označených produktů by se přitom měla pohybovat v řádu desítek centů. Dosažení tohoto cíle je ale velmi náročné.

Nosná frekvence RFID systému se pohybuje v následujících 4 komunikačních pásmech: 2,4 GHz, 900 MHz, 13,56 MHz, 135 kHz. Pro aplikace využívající krátké vzdálenosti je 13,56 MHz ideální frekvencí,



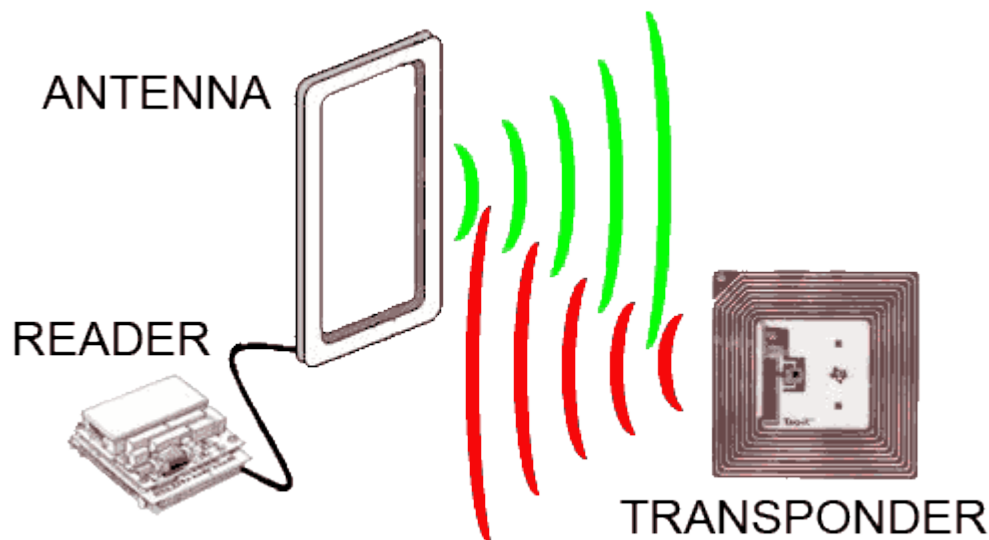
protože zde lze využít indukční vazbu blízkého pole a lze tak přenést efektivněji více energie. [9] RFID štítky s nosnou frekvencí 13,56 MHz mají malé rozměry (okolo dvou centimetrů na každé straně) a jsou schopny správně fungovat i v prostředí bohatém na kovy nebo vodu.

Na Obr. 1 je ukázka RFID systému složeného ze dvou hlavních částí umožňující bezdrátovou komunikaci: štítek/transpondér a čtečka. Čtečka inicializuje komunikaci vysláním signálu, kterým přes anténu napájí samotný štítek. Jakmile je štítek dostatečně nabitý, jsou data uvnitř štítku odeslána zpět do čtečky.

V pasivních RFID štítcích jsou uloženy cívky a kondenzátory, jejichž velikosti jsou navrženy tak, aby obvod rezonoval na frekvenci 13,56 MHz. Usměrnující obvod převede tento VF signál na zdroj stejnosměrného napětí, kterým je obvod napájen. Obvody uvnitř štítku (posuvné registry, paměťová pole, kódovací a dekodovací obvody), ještě potřebují ke své funkci hodinový signál.

V případě synchronního RFID vysokofrekvenční rozhraní sníží signálovou frekvenci 13,56 MHz (typicky se jedná o řády kHz), aby tak poskytla hodinový signál vnitřním obvodům a oddělí pomocné nosné signály pro zpětnou modulaci. Bohužel spínací rychlost tranzistorů, které jsou nanášeny tiskovou metodou, je o dva až tři řády menší, než požadovaná frekvence.

Další možností je asynchronní RFID. Nízkofrekvenční signál (několik jednotek kHz) je generován vnitřním obvodem, který je realizovatelný tištěnými tranzistory. Avšak frekvence z lokálního zdroje je s časem náchylná k vychýlení. Také díky různé stabilitě materiálu a modifikaci tisku se může u jednotlivých štítků lišit. Tento problém vyžaduje nový RFID protokol, který bude schopen správně komunikovat s asynchronními RFID štítky a odesílat data. V současné době není jasné, jestli se bude využívat spíše synchronní nebo asynchronní metoda. V obou případech výkonost a stabilita tištěných tranzistorů bude vyžadovat určitý vývoj, aby bylo těchto požadavků dosaženo.

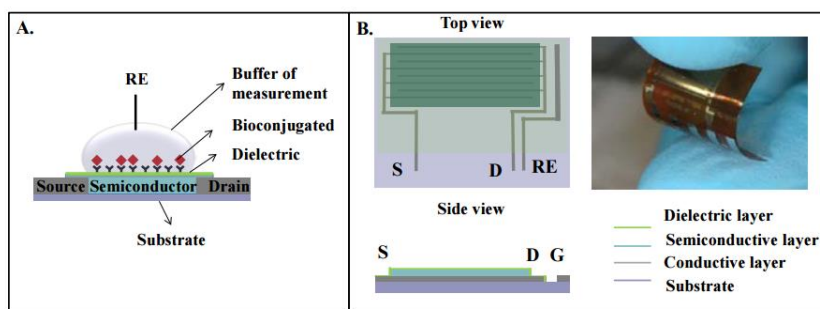


Obr. 1 RFID štítek s čtečkou, převzato z [10]

### 1.3.2 Senzory

Senzory byly hlavním tématem vědeckého a technologického vývoje, který byl oddělený od vývoje ostatní organické a tištěné elektroniky. Mnoho charakteristických prvků organické elektroniky však bylo využito při vývoji senzorů. [11]

V poslední dekádě významně vzrostla pozornost na poli aplikací bio senzorů. Hlavní změnou je nahrazení brány zavedením elektrolytu a referenční elektrody. [12] Navíc funkcionalizací OTFT (z ang. Organic thin-film transistor) s biologickými materiály mohou být získány BioFET (z ang. Bio Field effect transistor) senzory. [13] Hlavní výhodou bio senzorů založených na OTFT je možnost získat plně integrované, přenosné systémy s nízkými náklady kompatibilní s konceptem jednorázových senzorů. Momentálně jsou součástky vyráběny fotolitografickým procesem vyžadujícím drahé masky a provozně nákladné čisté prostory. Pro překonání těchto nedostatků byly vyvinuty tištěné OTFT senzory, jak je vidět na Obr. 2. Mezi příklady senzorů vyráběných touto novou technologií je vývoj elektrochemických bio senzorů obsahující natištěné zlaté elektrody pro odhalování biomarkerů rakoviny [14], detekce glukózy [15] nebo jiné aplikace [16].

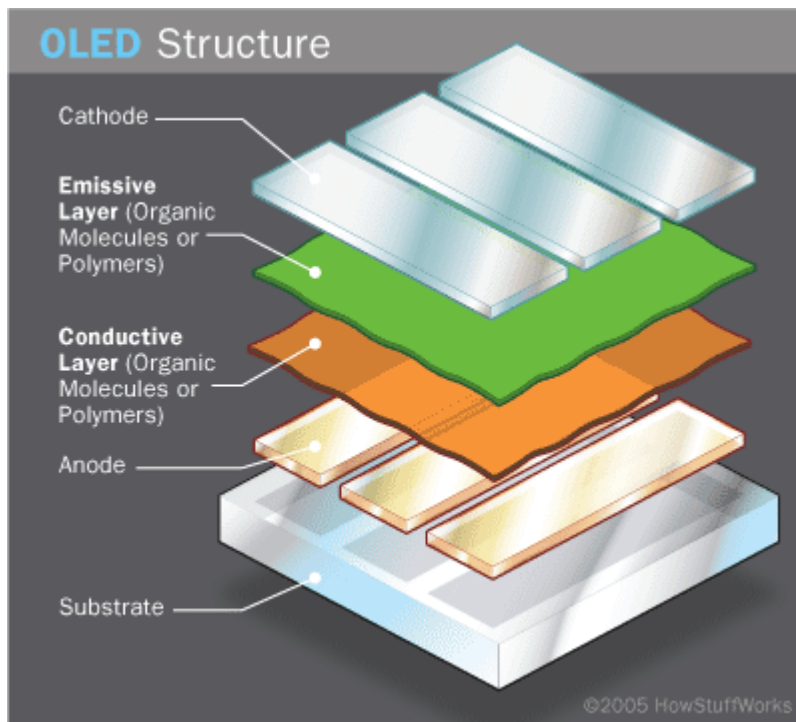


**Obr. 2** A) Schéma součástí tranzistoru BioFET; B) Horní a boční pohled znázorňující jednotlivé vrstvy BioFETu s ukázkou zařízení natištěném na flexibilním substrátu, převzato z [16]

Další důležitou překážkou pro implementaci senzorů z organické elektroniky je schopnost systému organické elektroniky dodávat analogový elektrický vstup a číst analogový elektrický výstup. Elektrochemické snímače budou vyžadovat měřit přinejmenším výstupní signál a také uplatňovat vstupní signál, přičemž signál bude moci být ovlivněn šumem velikosti maximálně zlomků mikrovoltů. Taková velikost šumu se stane více významnou, pokud se budeme pokoušet změřit malé fyzikální, chemické nebo biologické změny, které odpovídají malým změnám proudů. Analogové obvody využívající OTFT však významně trpí problematikou driftu a šumu a to vážně omezuje jejich využitelnost v senzorových obvodech.

### 1.3.3 Displeje

Zobrazovací technologie zaznamenala obrovský pokrok a stala se nezbytnou součástí elektronických systémů. Hlavní zobrazovací technologie, které se využívají u přenosných zařízení, jsou technologie tekutých krystalů – LCD (z ang. Liquid crystal display), organické světlo emitující diody – OLED a elektroforetické displeje EPD. Tyto technologie využívají jako svou hlavní část AMTFT, umístěné na zadní straně displeje, umožňující ovládat jednotlivé pixely každý zvlášť.



Obr. 3 Schéma AMOLED displeje, převzato z [40]

OLED je technologie, která se obejde bez podsvícení, má vyšší kontrast, větší pozorovací úhel a rychlejší odezvu. Obr. 3 ukazuje základní rozložení AMOLED (z ang. active-matrix Organic light-emitting diode) pixelů, zahrnující AMTFT a OLED prvky. OLED se běžně skládá ze tří vrstev – elektronové transportní vrstvy, organické emitující vrstvy a vrstvy dotování děr. Vyzářující vrstva OLED je řízena pomocí TFT (z ang. Thin-film transistor).

Jiným druhem displejů jsou elektroforetické displeje (EPD) využívající odraženého světla k napodobení běžných tištěných dokumentů. Na EPD displejích lze číst i za jasného slunečního světla bez potřeby dalšího napájení k zajištění čitelnosti obsahu na displeji, jak je běžné u podsvícených displejů. Zde je nutné zvýšit jas, aby byl zobrazovaný obsah i za jasného světla vidět. To u EPD technologie tedy není nutné, je proto slibnou technologií pro e-knihy nebo jiné aplikace s nízkou spotřebou energie. Momentálně jsou k vidění jak černobílé displeje. Elektroforetický display je složen z milionů mikro kapslí vložených mezi dvě elektrody. Každá z kapslí obsahuje bílé (kladně nabitě) a černé (záporně nabitě) pigmentové částice vložené do čisté tekutiny. Použitím záporného elektrického pole znamená zobrazení bílých pixelů. Naopak použitím kladného elektrického pole znamená zobrazení černých pixelů. Monochromatické a barevné displeje přislubují technologii pro realizaci ohebných displejů s nízkou spotřebou energie.

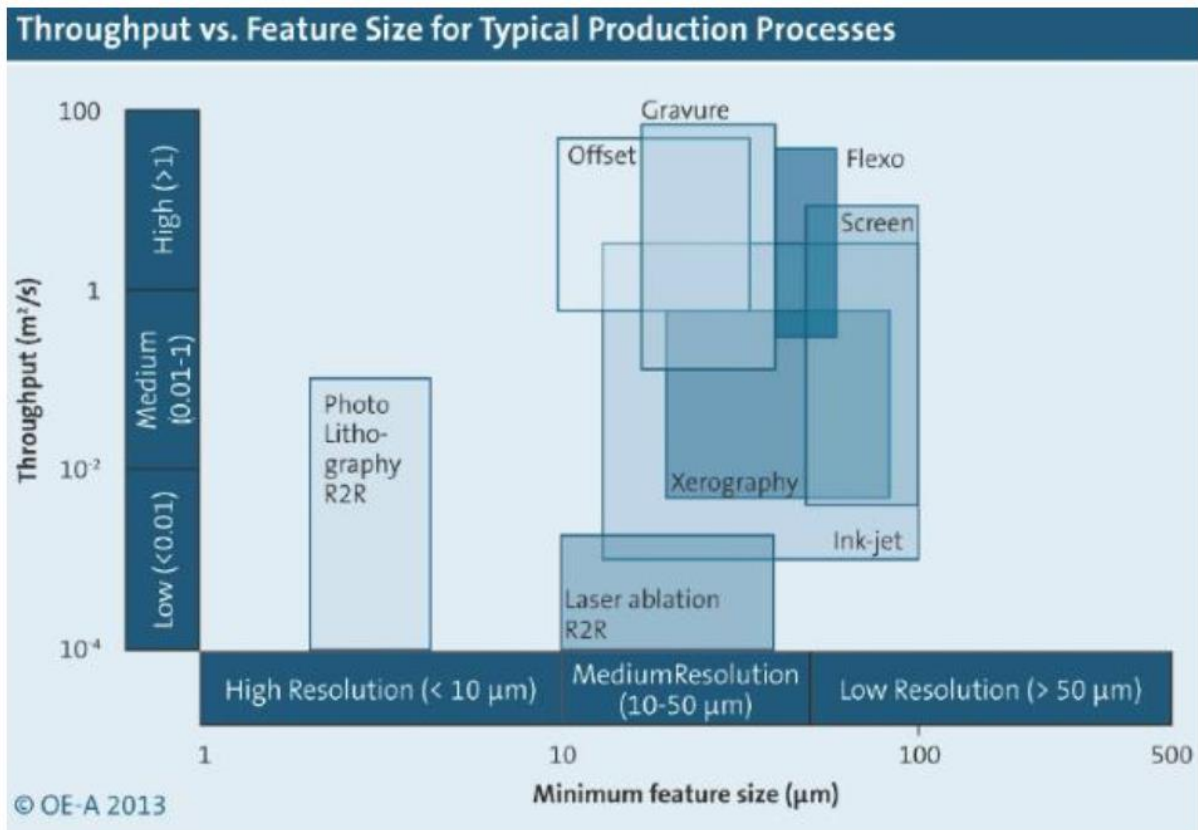
Displeje EPD jsou napětově řízené a nijak extrémně netrpí nízkou stabilitou OTFT. To je důvod, proč byly EPD displeje první aplikací, kde byla použita OTFT technologie s obvody aktivních matic. Avšak pro vysoké rozlišení displejů je vyžadována výroba polí aktivních matic. To je z důvodů dosažení nízkého rozlišení náročný úkol. V konečném důsledku je tisk vhodný spíše pro displeje s nízkou spotřebou energie a nízkým rozlišením (např. AMEPD, z ang. Active matrix electrophoretic display). Technologie použitá u ohebných displejů bude nejčastěji AMOLED nebo AMEPD, využívající levné plastové substráty, které umožní zpracování pomocí roll-to-roll s vysokou propustností, které snižuje výrobní náklady.

Na rozdíl od tištěných RFID štítků, u kterých jsou zapotřebí vysokorychlostní tištěné tranzistory, displeje vyžadují operační rychlost několika kHz. Rychlostní limit přechodu gate – source/drain není problém z hlediska menších možností tiskové technologie. Avšak parazitní kapacity mohou narušit napětí uložené přes kapacitní vazbu. Tento problém může omezit použití tištěných aktivních matic v displejích s vyšší barevnou hloubkou. Důsledkem je tedy nutnost použít tištěné tranzistory s minimem parazitních kapacit.

## 1.4 TECHNIKY TISKU

U technologie „large area“ může být použit stejně široký rozsah deposice a vzorování, jak byl použit při běžném tisku: sítotisk, ofsetový tisk, gumotisk, hlubotisk, inkjet, apod.

Lze tisknout prvky o rozměrech od 20 do 100 mikrometrů. Dle použité technologie je pak tloušťka natisknutých vrstev 100 nm až desítky mikrometrů. Každá metoda má svá určitá omezení a obecně lze říci, že procesy s velkým rozlišením mají menší výrobní výtěžnost, jak je vidět na Obr. 4.

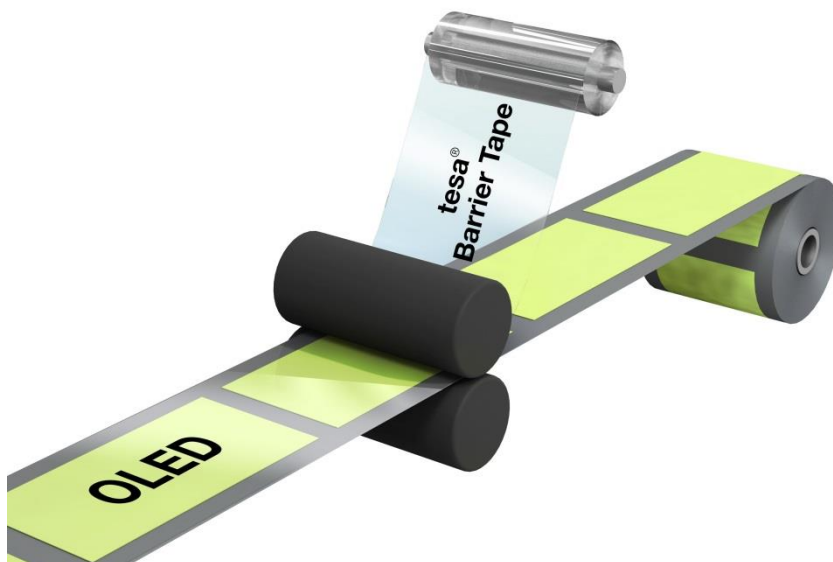


Obr. 4 Rozlišení a propustnost materiálových deposičních systémů, převzato z [17]

Sítotisk byl použit po několik let při aplikaci tištěných desek plošných spojů, kde menší rozlišení a silnější vrstva nejsou na obtíž. Ale mezi různými technikami tisku se hlubotisk a inkjet zdály být těmi nejvíce atraktivními technikami z důvodů jejich relativně vysokého rozlišení při tisku a kompatibilitě inkoustů. [11]

Na Obr. 5 je vidět schéma typického hlubotisku. Skládá se z válce, na kterém je vyhlouben požadovaný motiv (je možná také rozdílná hloubka vzoru na válci). Válec se otáčí v reservoáru

s inkoustem, který se zachytí do prohlubní na válci. Přebytečný inkoust je následně odstraněn stěrkou. Při dalším pootočení válce dojde k nanesení inkoustu na substrát. Výsledkem je, že můžeme námi zvolený motiv přenést na zvolený substrát ve velkém objemu výroby. [18] Hlubotisk je tak vhodný pro rychlou průmyslovou výrobu, na druhou stranu je ale příliš drahý pro výzkumné účely.



Obr. 5 Metoda deposičního systému Roll-to-roll

Na rozdíl od hlubotisku je inkjet tisk výhradně bezkontaktní technologií. Inkjet využívá buď termických, nebo piezoelektrických trysek k nanesení tak inkoustu ze zásobníku na substrát. Dosažení požadovaného motivu zde dochází pohybováním držáku se substrátem nebo hlavy s inkoustem, čímž je dosaženo tzv. tisku na vyžádání (ang. Drop-on-demand, zkratka DOD). [18] Flexibilita inkjet tisku umožňuje změnu motivu za běhu. Toto bezkontaktní a vrstvicí tištění se skvěle hodí pro tisk například senzorů, kde se rozdílné a choulostivé snímací materiály nanášejí bez vzájemného narušení. Inkjet tisk byl dále použit při tvorbě OLED displejů k oddělenému nanášení polymerních materiálů. [19]

Charakteristika sériového inkjet tisku je limitována maximálním množstvím naneseného inkoustu. Pro odstranění této nevýhody průmyslové inkjet hlavy používají stovky až tisíce trysek k navýšení produkce využitím paralelního tisku. [18]

Dosažení nízkonákladového inkjet tisku tištěné elektroniky je prozatím nejasné. Nicméně flexibilita této technologie je stále tou nejvhodnější pro výzkumné účely.

## 1.5 SOUČASNÝ STAV VÝVOJE TIŠTĚNÝCH ORGANICKÝCH INKJET PRVKŮ A OBVODŮ

Během posledních zhruba 20 let věnovaly společnosti zabývající se organickou elektronikou obrovské úsilí k vývoji technologie, která by mohla nahradit běžné anorganické polovodiče (křemík, galium arsenid, atd.), izolanty a vodiče (hliník, měď) za jejich organické varianty. Největší úsilí bylo zaměřeno na vylepšení vlastností materiálů, jako je pohyblivost, vodivost, dielektrické vlastnosti nebo stabilita.

Oproti klasickým materiálům, které jsou křehké a drahé na výrobu, organické materiály lze vyrobit s nízkými náklady, jejich stoprocentní využití však stále čeká na svou příležitost. [20][21]

Bylo publikováno velké množství článků a prací o organických materiálech z hlediska jejich chemických a fyzikálních vlastností, použitelných například pro organické tranzistory.

Stěžejní články o organické a tištěné elektronice byly publikovány panem Jabbourem [22] v roce 2010 a Schubertem [23] v roce 2013. Detailněji se zabývali mnoho o OTFT nebo OLED technologii, senzorech a jejich práce jsou proto hojně citovány.

Aktuálně se mnoho článků zabývá pasivními součástkami. Ale nebylo tomu tak vždy. Tištěné rezistory a kapacitory nejprve nebyli v hledáčku zájmů. Stalo se tak až když se uznaly výhody v použití při vývoji OTFT. Dnes již lze nalézt nové práce věnující se jak rezistorům [24][25] a kapacitorům [26], ale i jiným elektronickým součástkám. Další výzkum byl také věnován jiným zvláštním aplikacím jako antény a cívky s využitím tištěné elektroniky. [27][28]

Tranzistory jsou základním elementem v elektronice, která se používá jako přepínač, nebo v integrovaných obvodech. Může být použit jako samostatná součástka pro zesílení proudu nebo v kombinaci více tranzistorů jako logický člen. V některých případech tištěných tranzistorů není vyžadována vysoká rychlost přepínání (RFID štítky) [4] a aktivní matice v displejích. V některých aplikacích ovšem je vyžadována vysoká rychlost tranzistorů. Pro získání této vlastnosti je zapotřebí vysoké mobility tištěných materiálů. [28][29] Objevilo se několik prací, které demonstrovaly tištěné materiály s vysokou mobilitou, avšak zde byl často použit termický růst oxidu a napařené zlaté elektrody s modifikovanou strukturou.

Závěrem – mobilita, vodivost, relativní permitivita a pevnost, spínací rychlost, řídicí proud, napájecí proud, životnost (doba použitelnosti, využitelnost, teplota, vlhkost, mechanické napětí), zpracovatelnost, rozlišení tisku a tenkost aktivních a izolačních vrstev je výběr technologických parametrů, které musejí být dále vylepšovány vývojem nových materiálů, inkoustů a procesů. Takže je před námi ještě dlouhá cesta, než se dosáhne plného využití tištěné a organické elektroniky.



## 2 Nanášení funkčních materiálů metodou InkJet

Inkoustový tisk je náročnou a zajímavou technikou díky bezkontaktnímu tisku. V posledních deseti letech vzrostlo použití této technologie a v dnešní době se dostává do velkoformátového tisku ve vysoké kvalitě jak v černobílé tak barevné variantě.

Navíc flexibilita inkoustovému tisku významně snížila požadovaný čas na výzkum od samotné myšlenky až po ověření v laboratořích. Proto se významně zvýšil výzkum v oblasti vývoje procesů a prvků vyrobených pouze inkjet technologií [3], [30] a hybridními postupy. [22] Pokroky ve složení inkoustů učinily tisknutelné materiály, jako jsou kovové inkousty, komerčně dostupnými, což umožňují tisk složitějších struktur.

Vnitřní charakteristiky funkčních materiálů v tištěné elektronice vedou na různá omezení. Elektronické prvky mohou být vylepšeny charakterizací a optimalizací podmínek a parametrů, které vedou na různé tiskové morfologie. A proto je podstatné pochopit základní procesy tisku jednotlivých vrstev stejně jako vícevrstvé aplikace inkjetového tisku. Proto se v této kapitole budu ještě krátce věnovat technologii tisku inkjet. Návrh a výroba prvků a obvodů vyžaduje širokou znalost procesních aspektů a komplexních vztahů mezi koncepty, nástroji a výrobními postupy pocházející z různých vědeckých a technických oborů. Návrháři a výrobní inženýři čelili tomuto problému již před několika lety v počátcích křemíkové mikroelektroniky. Pomocí pravidel návrhu konceptů se podařilo odstranit tyto mezery ve znalostech jednotlivých odvětví. Pro návrhy a výroby potřebujeme alespoň stručná pravidla procesních charakteristik. Ty jsou obsaženy v charakterizaci geometrie a návrhu tištěných vzorů. Navíc metodika pro optimalizaci a charakterizaci morfologie tištěných čar a ploch bude vhodná i pro zjištění fyzikálních limitů výrobních procesů.

Základní tiskové procesy, které jsou nutné k zahájení výroby tištěných prvků a obvodů budou zmíněny v následující kapitole.

### 2.1 TECHNOLOGIE INKJET

V posledních letech vzrůstající zájem výroby metodou přímého zápisu umocnil vývoj nízkonákladových organických systémů. Z tohoto důvodu inkjet technologie přitahuje více pozornosti jako potenciální výrobní nástroj. Inkjet má mnoho vlastností pro zamyšlení a další vývoj: přímý tisk mikrostruktur načtených přímo z bitmapového souboru, nízké ztráty materiálu, vysokorychlostní tisk pomocí několika trysek.

Pravdivý slib mikro- a optoelektroniky spočívá v potenciálu produkce plně polymerních integrovaných obvodů bez nutnosti použití komplexní litografie. Nanášení požadovaného vzoru přímo na substrát pomocí malých kapiček generovaných DOD systémem, který nabízí nízkonákladové, bezkontaktní, nízkoteplotní, flexibilní a daty řízený proces.

Výroba elektronických mechanických mikrostruktur je obvykle časově a finančně náročný proces kvůli komplikovanému systému optické litografie. Proces výroby motivů využívající malé kapičky generované systémem DOD může být lákavou alternativou.



V tiskárnách se systémem DOD je v tiskové hlavě umístěna cartridge s inkoustem. Ta obsahuje trysky, ze kterých pod kontrolu programu vylétávají kapičky inkoustu. Vypuštěné kapičky vlivem gravitace a odporu vzduchu padají po balistické dráze, dokud nedopadnou na substrát. Kapičky se pohybují s hybností, kterou získaly na cestě, a povrchové napětí pomáhá k plynutí prostorem. Kapky potom vysychají, protože se začne odpařovat rozpouštědlo z inkoustu. Sousední nanesené kapičky se potom překryjí a postupně vytvoří požadovaný vzor, který je použit buď jako výsledný vzor vodivých cest, součástek apod., nebo se využije jako maska pro další procesní kroky.

Bezmasková litografie s použitím DOD systému má několik dalších výhod:

- Kvalita motivu není limitována hloubkou ostroty optiky. Od té doby, co kapky mohou cestovat relativně dlouhou vzdálenost bez významné změny trajektorie, motivy na nerovné povrchy, malé nebo 3D struktury se staly výrobně dostupnějšími.
- Tak jako nízkoteplotní procesy i mikro výroba může být provedena na nekonvenčních substrátech jako papír nebo plast, které jsou speciálně výhodné pro tvorbu nízkonákladových obvodů pro tenké displeje, identifikační karty a jiná elektronická jednorázová zařízení.
- Inkjet tisk může pracovat s velkou řadou materiálů. Lze využít roztoky na bázi kovů, organické polovodiče, polymery a materiály citlivé na expozici (nebo leptání).
- Jako daty řízené procesy, i inkjet tisk může tisknout soubory přímo z programů CAD jako hotové motivy, což usnadňuje návrh vzorů obvodů a součástek.

## 2.2 INKJET TISK ELEKTRONICKÝCH APLIKACÍ

Tisk elektronických prvků je více náročný tisk běžných médií. Prvně jmenovaný vyžaduje optimalizované tryskání stejně jako kvalitní vlastnosti natištěného filmu (dobré elektrické vlastnosti a hladký povrch), zatímco tomu druhému stačí dobře namíchané barvy a správné umístění kapek inkoustu. Například kapkové vychýlení u tištěné elektroniky může znamenat nefungující zařízení, zatímco u tisku klasickým inkoustem může obsah obrázku, s lehce vyosenými barvami být stále pro lidské oko dostatečně rozpoznatelný.

Inkjet tisk se může skládat ze tří hlavních kroků. K tomu, aby systém pracoval správně, musí být každý krok kompatibilní s ostatními dvěma. Například inkoust musí dobře smáčet povrch substrátu, ale nesmí se roztéct, než vyschne. Stejně tak musí mýt inkoust kompatibilní s celou tiskovou soustavou, od cartridge po trysky.

Nebo například z pohledu výrobce tiskových hlav vypovídají tyto aspekty o kvalitě tiskové kapaliny a tiskové hlavy. Pro funkční tiskové materiály je vývoj inkoustů a interakce inkoustu s povrchem rozhodující dosažení optimalizovaného tenkého filmu.

## 2.3 TISKÁRNA INKJET

### 2.3.1 Materiálová tiskárna Dimatix

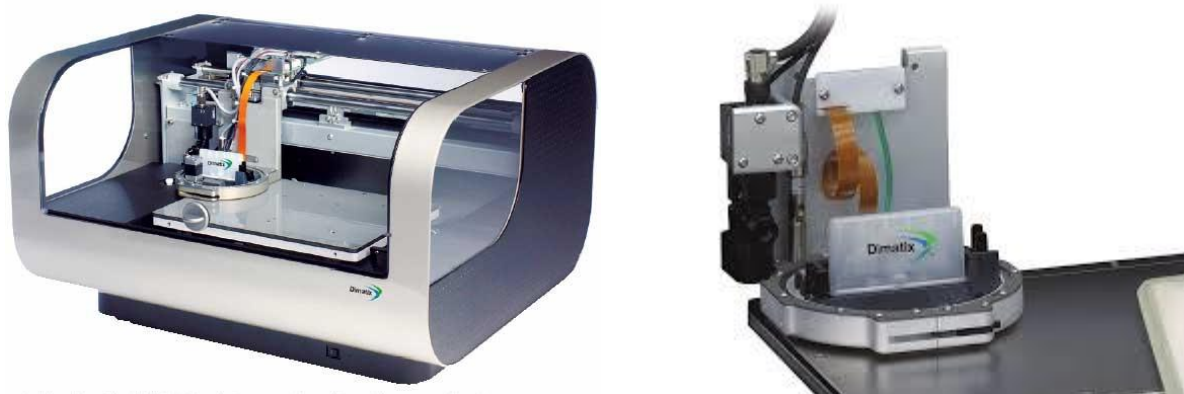
Dimatix DMP 2831, Obr. 6, je tiskárna vhodná pro komerční výzkumné podmínky s nízkými náklady. Je to nezávislý systém s držákem substrátů o velikosti papíru A4 s vakuovým přidržováním, držákem cartridge, sledovačem kapek, naváděcí kamerou atd. Krokový motor má rozlišení 5  $\mu\text{m}$  a opakovatelnost  $\pm 25\mu\text{m}$ .

Substrátová deska může být vyhřívána až na 60°C. Vyhřívání substrátů se používá k urychlení vysoušení inkoustu, aby docházelo k lepšímu tvarování natisknutých vrstev. Ale výhřev substrátu může zvýšit teplotu trysek a zhoršit tak vlastnosti trysek.

Běžně je tisková hlava vybavena tryskami, které vypouští inkoust o objemu 10 pl. Je ale možné vyměnit ji za hlavu s tryskami, které jsou schopny vypouštět až 1 pl.

Motiv, který chceme, aby byl vytisknut, může být do tiskárny dodán v bitmapovém souboru. Avšak motiv může být tištěn jedině v rastrovém módu. To znamená jeden horizontální řádek za čas, i když se tiskne vertikální řádek. To omezuje tisk jedno pixelových řádků interdigitálních zařízení.

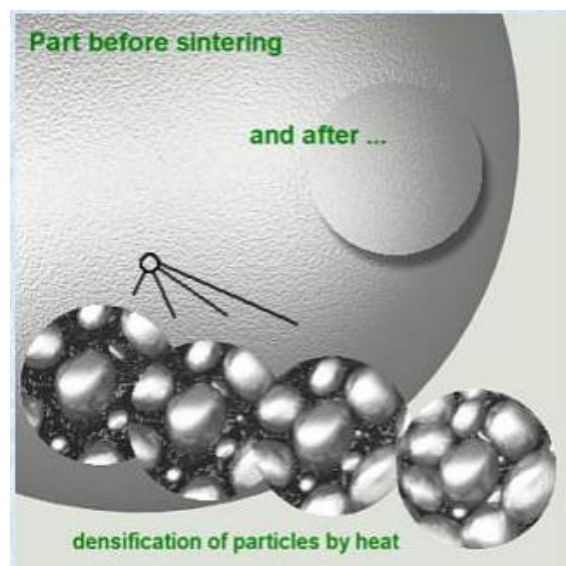
Vestavěný software poskytuje funkci rychlého zarovnání (XY zarovnání a theta kalibraci). Standartní procedura čištění trysek obsahuje odkápnutí a vypláchnutí trysek. Může být ale také definováno uživatelem pro efektivní čisticí proceduru. Tiskárna je umístěna v čisté laboratoři s přísnými hygienickými nařízeními.



Obr. 6 Tiskárna Dimatix DMP-2831

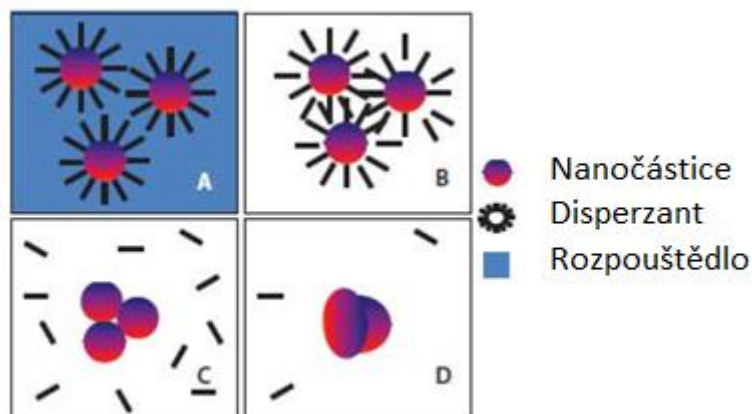
## 2.4 SINTROVÁNÍ

Podstatnou součástí inkjet tisku je také sintrování. Po nanesení inkoustu na substrát nemá ještě inkoust požadované vlastnosti. Stále obsahuje velké množství rozpouštědla a částice odpovědné za přenos náboje tvoří „jeden celek“. Natištěná vrstva tak vykazuje velmi vysoký odpor. Aby inkoust získal požadované vlastnosti je zapotřebí sintrování. Jde o koalescenci pevných částic, ke které dochází při teplotách menších než je bod tání, ale již dostatečně velkých, kdy již může docházet k difuzi částic, Obr. 7 a Obr. 8. Existuje několik způsobů. V této práci jsem použil dvě základní metody: uzavřenou sušárnu, která vyhřeje vnitřní prostor na požadovanou teplotu a horkou plotýnku, kdy je materiál ohříván přímým kontaktem. [31]



Obr. 7 Detailní pohled na změny při sintrování. Jednotlivé částice se vlivem tepla spojí v jeden celek, převzato z [31]

Jednou z dalších možností je také sintrování intenzivním bleskem, známé také pod označením „Intense pulse light (IPL) sintering“, nebo „photonic sintering“. Tato metoda je vhodná zejména pro techniku tisku Roll-to-roll nebo kontinuální pásový tisk. Lze ji však použít i pro ostatní techniky. Natištěný vzor se vloží pod zdroj ostrého světla a ten jej během krátké chvíle několika pulsními výboji vysintruje. Tato technika je založena na generování světelného výboje s vysokou energií. Na rozdíl od běžného sintrování v peci dochází k ohřevu substrátu jen do několika  $\mu\text{m}$  a ten tak není tepelně namáhán. Dochází pouze k ohřevu inkoustu po dobu jednotek až desítek mikrosekund.



**Obr. 8** Schématický obrázek procesu sintrování nanočásticového inkoustu: A) Stav před zahřátím; B) Stav po odpaření rozpouštědla; C) Začátek sintrování; D) Po dokončení sintrování; upraveno z [32]

Tato metoda je proto vhodná i pro substráty, kterým by vysoká teplota mohla škodit, jako je třeba papír nebo PET. Další velkou výhodou je zkrácení času celého procesu. Při standardním postupu je zapotřebí přibližně dvou hodin k dosažení požadovaného výsledku. Při použití Pulse forge stačí jednotky až desítky sekund. Příklad zařízení Pulse forge je na Obr. 9. [17][33][34]



**Obr. 9** Zařízení pro sintrování metodou Pulse forge, dostupné z [33]



### 3 Vývoj základních elektronických prvků

Minulá kapitola byla věnována technologii tisku a jeho specifikaci. Tato kapitola se bude věnovat výrobě základních součástek.

Tisknutelnost směsi inkoustů vhodných pro vodiče, rezistory a dielektrika je nyní ve výzkumu. Charakterizují se natisknuté vrstvy z hlediska funkčních a morfologických vlastností. Dále se také studuje kompatibilita vybraných materiálů pro jejich využití jako rezistorů a kapacitorů. Natištěné tenké filmy a součástky jsou charakterizovány, co se týče jejich relevantních parametrů. Důraz je kladen především na charakterizaci prvků, abychom je analyzovali z hlediska jejich stability, rozšiřitelnosti a variability za účelem získání vhodných zařízení, které jsou schopny uplatnit se na trhu.

Rezistory a kapacitory, které využívají rozdílné techniky a materiály, jsou vyráběny a charakterizovány stejně jako obvody RC filtrů, aby se ukázala jejich proveditelnost a návratnost. Z procesního úhlu pohledu, zde popsané postupy jsou významné, protože nevyžadují vysoké teploty, nízké tlaky nebo masky a proto poskytují nízkonákladový přístup k výrobě pasivní elektronických součástek a jednoduchých obvodů použitelných pro elektronický průmysl: kromě jiných příkladů, zapaštěné pasivní filtry na deskách tištěných spojů, nebo v budoucnu používané elektronice v oblečení. Budoucí „oblékatelné“ elektronické obvody vyžadují pružné součástky, které mohou být natištěny za dostatečně nízkých teplot (<150°C), aby nedošlo k poškození substrátu. V literatuře je uvedeno několik kroků k vytvoření pasivních součástek vyrobených inkjet tiskem. Některé postupy využívající další výrobní metody navíc, oproti inkjet tisku, využívají buď pevné substráty, nebo vyžadují zpracování za vysokých teplot, které jsou příliš vysoké pro většinu substrátů.

#### 3.1 MĚŘENÍ PLOŠNÉ REZISTIVITY

Za účelem studování efektů tiskových a sintrovacích parametrů na finální vodivost natištěných cest bylo provedeno mnoho různých experimentů. Pro měření výsledné vodivosti byla použita Van der Pauwa metoda.

Měření odporu polovodivých a vodivých struktur patří k základním úkonům při jejich charakterizaci. U struktur jako jsou kontaktní plošky, průchody nebo metalické struktury jsou typické hodnoty el. odporu v desítkách až stovkách miliohmů. Pro měření takovýchto hodnot a struktur je nevhodnější použít metodu, kdy měřenou strukturou prochází známý proud a je snímáno napětí.

Při běžném měření rezistivity vede čtyřvodičová metoda na obdélníkový tvar tvořený čtyřmi sondami, které jsou umístěny na vodivé cestě. Proud je vpouštěn do obvodu mezi svorkou A a B. Napětí se pak měří mezi svorkami C a D, které musí být dostatečně daleko od proudových svorek, aby se udržel stálý proud mezi napěťovými svorkami, ale zároveň by mezi všemi svorkami měla být stejná vzdálenost. Výsledná rezistivita je pak získána z naměřeného napětí, pouštěného proudu a geometrie vzorku.

Jednou z typických struktur používaných v polovodičové technice nebo charakterizace součástek je Van der Pauw. Tuto techniku popsal v roce 1958 L. J. van der Pauw. Jde o čtyřvodičové měření

předem stanovených struktur. Díky tomuto postupu může být definována rezistivita, plošný odpor, plošná hustota nosičů náboje, plošný odpor, pohyblivost nosičů nebo šířka čáry.

Aby měření proběhlo úspěšně, musí být nanosená struktura velmi tenká, ve všech místech stejně silná, homogenní a symetrická. Kontakty, kterými je struktura spojena s měřícím přístrojem by mely být mnohem menší než měřená část a mely by se nacházet na okrajích struktury.

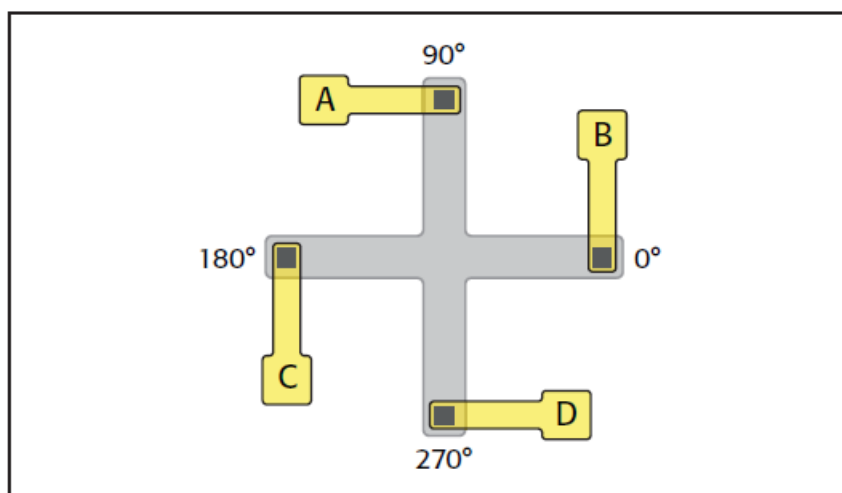
Na Obr. 10 je zobrazen nejčastěji používaný motiv pro měření odporu materiálu.

Pokud jsou podmínky splněny, lze začít s měřením. Jak již bylo zmíněno výše, je vhodnější nechat vzorkem protékat proud a snímat napětí. Protože u tohoto způsobu očekávat hodnoty odporu jen několika ohmů, budou hodnoty napětí a proudu také malé. Takovéto hodnoty odporu jsou také u přírodních kabelů nebo přechodů a mohou ovlivňovat měření. Proto se měření koriguje změnou polaritity proudu a také záměnou kontaktů z proudových na napěťové. Tím lze eliminovat offset napětí termoelektrických potenciálů způsobených převážně způsobem měření.

Výsledky by u jednotlivých měření měly být velmi blízké. Pokud tomu tak není, ukazuje to na nějakou nedokonalost měření. Může se jednat o vady měřeného materiálu, nebo může být chyba v samotném nastavení měření.

Z následujících rovnic je možné odvodit zvolené veličiny, nejčastěji však rezistivitu. Dále lze dopočítat i plošný odpor.

Aby měření proběhlo úspěšně, musí být nanosená struktura velmi tenká, ve všech místech stejně silná, homogenní a symetrická. Kontakty, kterými je struktura spojena s měřícím přístrojem by mely být mnohem menší než měřená část a mely by se nacházet na okrajích struktury.



Obr. 10 Motiv pro měření plošného odporu Van der Pauw, převzato z [35]

Pokud jsou podmínky splněny, lze začít s měřením. Jak již bylo zmíněno výše, je vhodnější nechat vzorkem protékat proud a snímat napětí. Protože u tohoto způsobu očekávat hodnoty odporu jen několika ohmů, budou hodnoty napětí a proudu také malé. Takovéto hodnoty odporu jsou také u přírodních kabelů nebo přechodů a mohou ovlivňovat měření. Proto se měření koriguje změnou polaritity proudu a také záměnou kontaktů z proudových na napěťové. Tím lze eliminovat offset napětí termoelektrických potenciálů způsobených převážně způsobem měření.

Výsledky by u jednotlivých měření měly být velmi blízké. Pokud tomu tak není, ukazuje to na nějakou nedokonalost měření. Může se jednat o vady měřeného materiálu, nebo může být chyba v samotném nastavení měření.

Z následujících rovnic je možné odvodit zvolené veličiny, nejčastěji však rezistivitu. Dále lze dopočítat i plošný odpor.

$$e^{-\left(\pi \frac{d+R_{AB,CD}}{\rho}\right)} + e^{-\left(\pi \frac{d+R_{BC,AD}}{\rho}\right)} = 1 \quad 1)$$

$$R_S = \frac{\pi R}{\ln(2)} \frac{\Omega}{\square} \quad 2)$$

## 3.2 REZISTORY

Nezákladnější elektronickou součástí je bezesporu rezistor. Ten je tvořen rezistivním materiálem a v elektrickém obvodu se ideálně projevuje jedinou vlastností – elektrickým odporem. Ten se používá buď pro snížení velikosti elektrického proudu, nebo vytvoření úbytku napětí na rezistoru. Rezistor je poměrně jednoduchá součástka a v mnoha elektronických součástkách hraje zásadní roli. Obvykle je tvořen proužkem homogenního materiálu na koncích zakončeným vodivým materiálem – drátkem v případě klasických pájených rezistorů nebo vodivou ploškou v případě smd odporů.



Obr. 11 Ukázka natištěných rezistorů, převzato z [17]

Elektrický odpor udává, jak dobře je prvek schopná bránit průtoku elektrického proudu a je závislý na rezistivitě materiálu a tvaru součástky, tj. délka, šířka a výška prvku, jak je ukázáno v následující rovnici pro výpočet odporu vodiče (3):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{T \cdot W} = \frac{\rho}{T} \cdot \frac{l}{W} \quad 3)$$



kde  $R$  je odpor lineárního rezistoru,  $\rho$  je rezistivita materiálu,  $l$  je délka vodiče,  $S$  je obsah průřezu vodiče,  $T$  je tloušťka a  $W$  je šířka vodiče /  $l$  je délka,  $S$  je průřez,  $T$  je tloušťka a  $W$  šířka odporového pruhu.

Rovnice (3) může být dále vyjádřena ve tvaru:

$$\left[\frac{\rho}{T}\right] = \frac{\Omega}{\square} \quad 4)$$

(„Ohm na čtverec“) -> Plošný odpor -  $R_{\square}$

$$\left(\frac{\rho}{T}\right) \rightarrow \text{Plošný odpor } \frac{\Omega}{\square} \rightarrow R_{\square} \quad 5)$$

$$\left(\frac{L}{W}\right) \rightarrow \text{Počet čtverců } (\#_{\square}) \quad 6)$$

$$R = R_{\square} \cdot \#_{\square} \quad 7)$$

K získání správné velikosti plošného odporu musíme také vzít v úvahu přechodové odpory kontaktů, které se vyskytují mezi přechodem kovového a rezistivního materiálu. Tento přechodový odpor je úměrný ploše kontaktů mezi materiály a lze ho vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$R_c = \frac{\Phi_c}{W_c \cdot L_c} + \rho_{\text{vodivé}} \frac{L_c}{T \cdot W_c} + \rho_{\text{rezistivní}} \frac{L_c}{T \cdot W_c} \quad 8)$$

kde  $\Phi_c$  je mezera mezi energetickými hladinami obou materiálů a  $\rho$  je rezistivita vodivého a rezistivního materiálu. Výsledný odpor celého prvku je pak dopočítán pomocí rovnice (9):

$$R_{\text{celk}} = R + 2 \cdot R_c \quad 9)$$

Větších hodnot elektrického odporu lze docílit zvyšováním rezistivity materiálu, zvětšením délky nebo zmenšením průřezu. Všechny tyto faktory umožňují návrh rezistorů s různými strukturami, tvary a materiály.

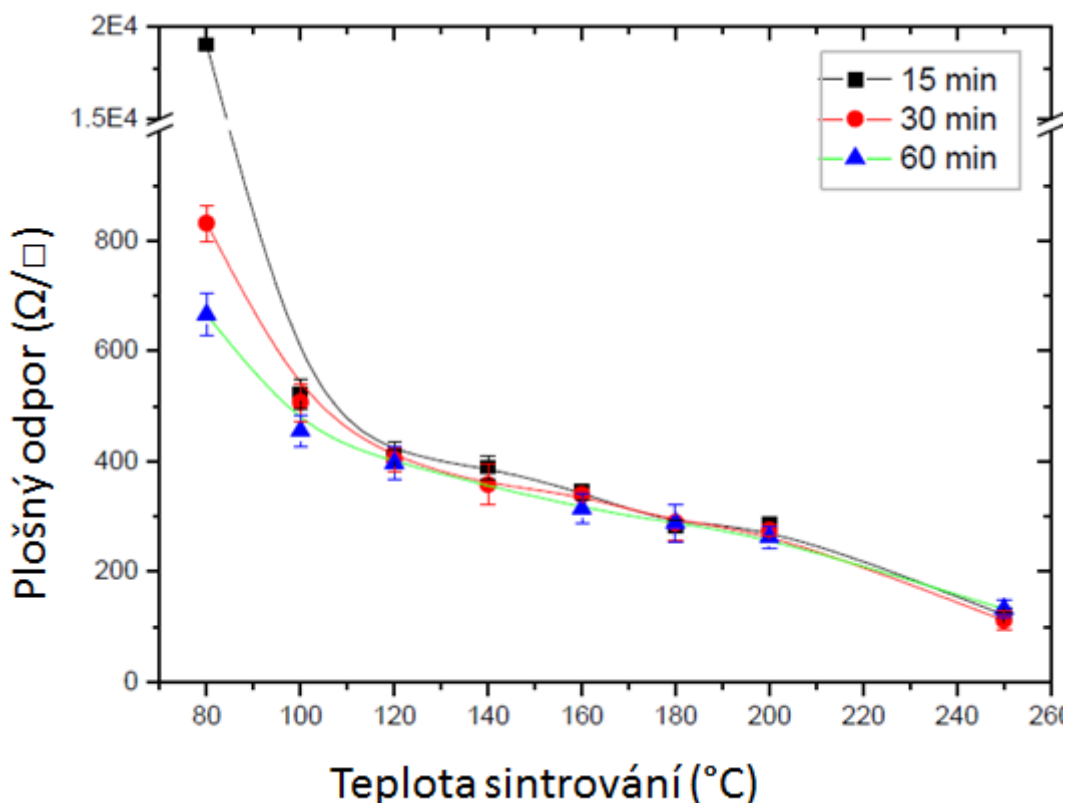
Dnes je možné vyrábět tištěnou technologií mnoho druhů rezistorů. Lze získat přesné a malé rezistory s určitou tolerancí, nebo odolné rezistory s vyšší tolerancí. Pro polymerní silnovrstvé rezistory (ang. Polymer thin-film, zkratka PTF) lze jistě použít mnoho nových a moderních substrátů, od kterých očekáváme stále ještě troch netradiční vlastnosti jako ohebnost nebo transparentnost.

Stále však lze využít jako substrát desku plošných spojů. Inkousty na tištění elektronických prvků jsou navrhovány tak, aby byly s tímto materiálem použitelné. Pro PTF rezistory nanášené na desky plošných spojů se uvádí sintrovací teplota max 180 °C. Výhodou je větší variabilita velikosti plošného odporu oproti tenkovrstvým variantám, avšak nevýhodami jsou nižší stabilita a menší tolerance. V důsledku teplotní roztažnosti může také docházet k praskání polymerů.

Výsledná hodnota odporu závisí na těchto faktorech: na teplotě a času sintrování, tloušťce rezistoru, tvaru motivu a materiálu. Při natištění širší čáry bychom očekávaly nižší odpor než i tenčí čáry, se zachováním ostatních podmínek. Odpor však bude vyšší. Je to v důsledku toho, že zvětšení tohoto rozměru bude použito více inkoustu, ten bude mít větší hustotu – bude tedy nanášeno větší množství vodivého materiálu, který je potřeba vysintrovat a na to je potřeba více času. Pro zachování původních podmínek a dosažení nižšího odporu je tedy při zvětšení šířky motivu ještě nutné upravit inkoust snížením hustoty vodivých přísad, jak je uvedeno v[17].

### 3.2.1 Anorganické rezistory

Jak již bylo zmíněno výše v textu, za nižších sintrovacích podmínek (nižší teplota a čas sintrování) vede na větší velikost plošného [high resistance per square]odporu. Na Obr. 12 je vidět, že tenký film stříbrného inkoustu sintrovaného při 80 °C po dobu 15 min má plošný odpor 18,9 Ω/□. V běžné křemíkové elektronice se jako rezistivní materiál používá polysilikon, u kterého hodnoty plošného odporu začínají na 200 – 300 Ω/□ až k několika kΩ/□. Zkrácením sintrovacího času a snížením teploty sintrování natištěných vrstev se můžeme dostat na stejné hodnoty. [17]



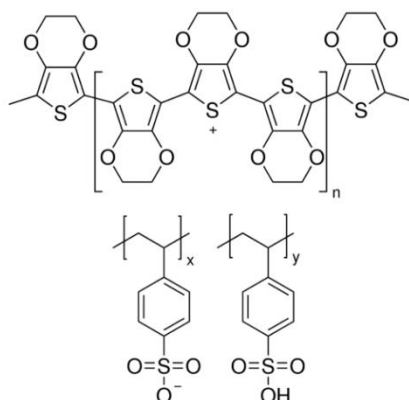
Obr. 12 Závislost plošného odporu na teplotě, upraveno z [17]

### 3.2.2 Organické rezistory

Organické vodivé materiály se dají použít také jako rezistory, kvůli jejich nízké vodivosti v porovnání s anorganickými kovovými materiály. Vodivé polymery jsou organické polymery, které vedou elektrický proud stejným způsobem jako polovodiče. Největší výhodou vodivých polymerů je jejich zpracovatelnost. Tyto polymery mohou kombinovat mechanické vlastnosti plastů (ohebnost, elasticitu, houževnatost,...) s relativní elektrickou vodivostí. Jejich vlastnosti se dají vylepšovat použitím metod organické syntézy. Nicméně při nízké vodivosti, v určitém rozmezí, jsou pak využívány jako užitečné rezistivní cesty.

Materiál, jehož základem je poly(3, 4-etylendioxythiofen), zkráceně PEDOT. V praxi se často používá vázaný s polystyrensulfovou kyselinou (PSS) nebo bis-polyetylglykolem (PEG). PEDOT:PSS je směs dvou polymerů: jeden vede kladné náboje a ten druhý záporné. Často se využívá na průhledné vodivé kontakty dotykových obrazovek, OLED displejích a elektronických knížkách jako náhrada ITO vrstev.

PEDOT:PSS, molekulární struktura je na Obr. 13, je žlutý tekutý inkoust obsahující směs vodivých polymerů, organické rozpouštědlo a polymerní pojiva speciálně připravená pro technologii inkjet tisku. [17]



Obr. 13 Molekulární struktura PEDOT:PSS [41]

### 3.3 KAPACITORY

Kapacitor je elektronický prvek, který uchovává elektrický náboj. V nejjednodušším provedení se jedná o dvě kovové desky oddělené nějakým izolačním nebo dielektrickým materiálem. Po přiložení napětí se zde vytvoří elektrické pole, které zaujme na jedné elektrodě kladný a na druhé záporný potenciál. Toto uspořádání trvá tak dlouho, dokud elektrický potenciál odpovídá přiloženému napětí. Elektrický náboj uložený v dielektriku zde ještě zůstává i po odstranění napájecího napětí, dokud nedojde k jeho vybití. Kapacita pak udává, jak dobře je elektrický náboj uschován, resp. jaké množství náboje jsme schopni uschovat.

Tiskovou technologií lze vytvořit dva druhy kapacitorů: kov-izolant-kov (MIM), Obr. 14, a prolínající se – interdigitální kapacitory. Při tisku MIM kapacitorů jsou postupně nanášeny vrstvy vodivého

inkoustu, poté izolačního a nakonec opět vodivého. Při tomto postupu je nutné přesné slícování elektrod a jejich jednotvárnost. Důležitá je také vrstva dielektrika, která nesmí obsahovat žádné díry nebo slabě natištěnou vrstvu inkoustu, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností výsledného kapacitoru. [17]



Obr. 14 Příčný řez nanášených vrstev kapacitoru



## 4 Praktická část

K tisku všech struktur uvedených v této práci byla použita Inkjet tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831, která je dostupná v laboratoři nanotechnologie na katedře mikroelektroniky. Tiskárna je typu Drop-on-Demand s piezoelektrickým buzením trysek. Hlavní využití pro tuto tiskárnu je v odvětví vývoje a výzkumu v laboratorních podmínkách. Tiskárna je zobrazena na Obr. 15, detail cartridge pak na Obr. 16.



Obr. 15 Inkjet tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831

V Tab. 1 jsou shrnuty základní informace o tiskárně.

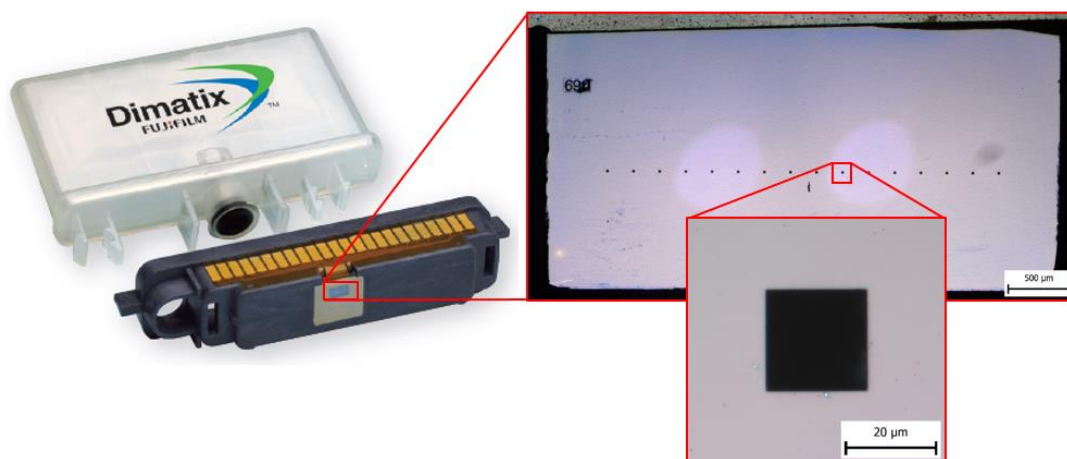
<b>Rozměry: (Výška/šířka/hloubka)</b>	584 mm / 673 mm / 419 mm
<b>Hmotnost</b>	43 kg
<b>Tisknutelná plocha</b>	210 mm x 315 mm (tloušťka < 0,5 mm) 210 mm x 260 mm (tloušťka 0,5 - 25mm)
<b>Opakovatelnost posuvu</b>	±25 um
<b>Výhřev substrátu</b>	až do 60 °C
<b>Výhřev tiskové jednotky</b>	až do 70 °C
<b>Max frekvence nanášení kapek</b>	1 až 20 kHz
<b>Formát vstupních dat:</b>	DXF, Gerber, GDSII and OASIS konvertované do bitmapy

Tab. 1 Technické informace o tiskárně

V Tab. 2 jsou uvedeny vlastnosti cartridge.

<b>Trysky</b>	Piezeoelektrické, 16 v jedné řadě, rozteč 254 $\mu\text{m}$
<b>Velikost trysky</b>	21,5 $\mu\text{m}$ resp. 9 $\mu\text{m}$ , záleží na typu cartridge
<b>Nominální objem kapky</b>	10 pl nebo 1 pl, podle typu cartridge
<b>Plnicí objem</b>	1,5 ml

Tab. 2 Vlastnosti cartridge



Obr. 16 Cartridge pro materiálovou tiskárnu, upraveno z [36]

Tiskárna dále disponuje dvěma kamerami. Drop watcher kamera umožňuje pohled na trysky a lze tak sledovat trajektorii letící kapky z tiskové hlavy. Fiducial kamera pak slouží nastavení počátečního bodu tisku, optické kontrole a měření natisknuté struktury. Tiskárna je vybavena podložkou pro substrát s vakuovým přidržováním substrátu. Podložka se pohybuje ve třech směrech pro optimalizaci tisku – X, Y a kolem osy Z, pro zajištění rovnoběžného tisku s hranou substrátu. Motivy lze vytvářet přímo ovládacím softwarem, nebo provést konverzi z podporovaných formátů.

V následujících několika bodech jsou shrnuty požadavky vlastností inkoustu pro úspěšný tisk:

- Dynamická viskozita: 10 – 12 cPs (0,010 – 0,012 Pa·s)
- Povrchové napětí: 28 – 42 dynes/cm (0,028 – 0,042 N/m)
- pH: 4 – 9
- Velikost částic: Menší než 0,2  $\mu\text{m}$  (1/100 velikosti trysek)
- Bod varu: doporučen vyšší než 100° C
- Hustota: Větší než 1 g·cm<sup>-3</sup>

## 4.1 PŘÍPRAVA PŘED TISKEM

### 4.1.1 Příprava inkoustu

Před zahájením samotného tisku je nutné provést několik nezbytných kroků. Jedním z nich je příprava inkoustu, aby měl požadované vlastnosti pro bezproblémový tisk. Dostupné inkousty jsou již pro Inkjet tisk přizpůsobeny z výroby, nebo je doporučen další postup pro jejich přípravu. Před naplněním inkoustu do cartridge je doporučeno je přefiltrovat. Doporučen je filtr o propustnosti

0,2  $\mu\text{m}$  velkých částic. Inkoust je protlačován přes filtr, kde se zachytí větší části než v tomto případě oněch 0,2  $\mu\text{m}$ , které by mohly způsobit ucpaní trysky. Vlivy jednotlivých parametrů na kvalitu tisku lze dohledat například v[37], [38].

Plnicí otvor se nachází na spodní straně nádoby na inkoust. Po naplnění maximálním objemem 1,5 ml se cartridge uzavře částí s tryskami a kontakty. Obě části je důležité dobře spojit, jinak hrozí, že bude inkoust vytékat. Po té je zapotřebí nechat cartridge stát tryskami dolů půl hodiny, aby inkoust stekl do kanálků a do jednotlivých trysek.

Pro každý inkoust jsou dále stanoveny podmínky skladování. Většina inkoustů se skladuje při teplotách okolo 4 °C. V laboratoři jsou tak inkousty uchovávány v chladničce. Před opětovným použitím cartridge je nutné inkoust nechat temperovat na okolní teplotu. Před vložením cartridge do tiskárny se také poručuje provést optickou kontrolu, zda nejsou trysky zanesené, nebo zda jimi nevytéká inkoust.

Pro inkousty použité v této práci jsou uvedeny hodnoty velikosti pevných částic maximálně 50 nm. První cartridge byly tedy naplněny bez filtrování. Již během prvního použití se však začaly vyskytovat problémy s tiskem, kdy kapička inkoustu létala do strany nebo nevlétla vůbec. V inkoustu zřejmě došlo ke shlukování pevných částic, které pak ucpávaly trysky. Následovalo tedy přefiltrování inkoustu. Nejprve byl použit filtr Whatman Purardisc 25 TF 0,2  $\mu\text{m}$  (hydrofobní materiál filtru). Ani použití tohoto filtru však nedošlo k úplnému odstranění výše popsaných problémů.

Dále byly použity filtry Acrodisc PSF Gx F/GHP 0,2  $\mu\text{m}$  (hydrofilní materiál filtru). Jejich použití bylo mnohem jednodušší a jejich funkčnost se projevila již při prvním tisku. Cartridge s přefiltrovaným inkoustem těmito filtry vydržel bez problémů tisknout stejnou tryskou téměř do vyčerpání všeho inkoustu, což nebylo dosud možné.

Ve filtrech však zůstávalo velké množství inkoustu, pro další použití by bylo vhodné vyzkoušet ještě další typy filtrů.

### 4.1.2 Příprava substrátů

Příprava substrátu se odvíjí dle zvoleného typu substrátu. Základní úpravou je vhodná velikost. Tiskárna dostupná v laboratoři disponuje maximální velikostí substrátu ve formátu A4. Větší formáty třeba oříznout na tuto velikost. U menších formátů je zapotřebí zakrýt zbylé nezakryté otvory pracovní podložky tiskárny, aby bylo zajištěno vakuové přidržení substrátu.

Dále je důležitá úprava povrchu. Nejčastěji je důležité odstranit z povrchu všechny nečistoty a dále upravit povrchovou energii tak, aby se inkoust na substrátu příliš neroztékal, nebo aby netvořil ostrůvky inkoustu. K mytí lze použít čisticích prostředků, rozpouštědel, ultrazvuku, nebo plasmy. Při použití substrátů s povrchovou úpravou, jako v tomto případě fotopapír, nebo PET není třeba tyto substráty dále čistit. Stačí pouze dbát na to, aby se před tiskem neznečistili.

Mokrou cestou je důležité čistit například skleněné substráty. Doporučený je postup s několika roztoky. Nejprve je sklo očištěno teplou vodou s mycím prostředkem. Poté je vhodné opláchnout deionizovanou vodou. Následuje série čištění v ultrazvuku. Ultrazvuková čistička je naplněna deionizovanou vodou. Do té jsou vloženy kádinky s acetonem, izopropylalkoholem a deionizovanou vodou. Sklíčka jsou postupně v tomto čištěna v tomto sledu:



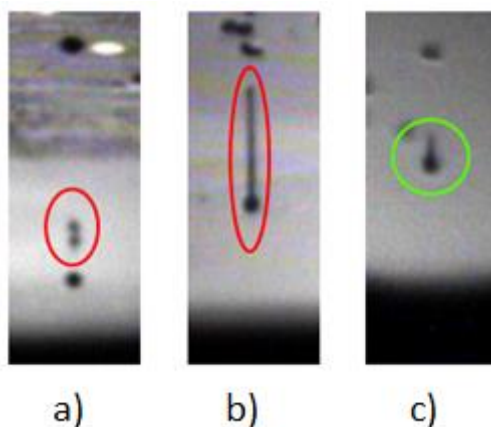
Aceton – 5 min -> Izopropylalkohol – 5 min -> Deionizovaná voda – 5 min.

Po této proceduře následuje ofouknutí stlačeným vzduchem nebo dusíkem. K dokonalému očištění je vhodné dále přidat ještě čištění plasmou, čímž se docílí dokonalých vlastností povrchu skla. Vhodné nastavení parametrů plasmové čističky jsou např. v [36]. V současné době laboratoř plasmovou čističkou není vybavena, tisk tak probíhal na sklíčka očištěná pouze mokrou cestou.

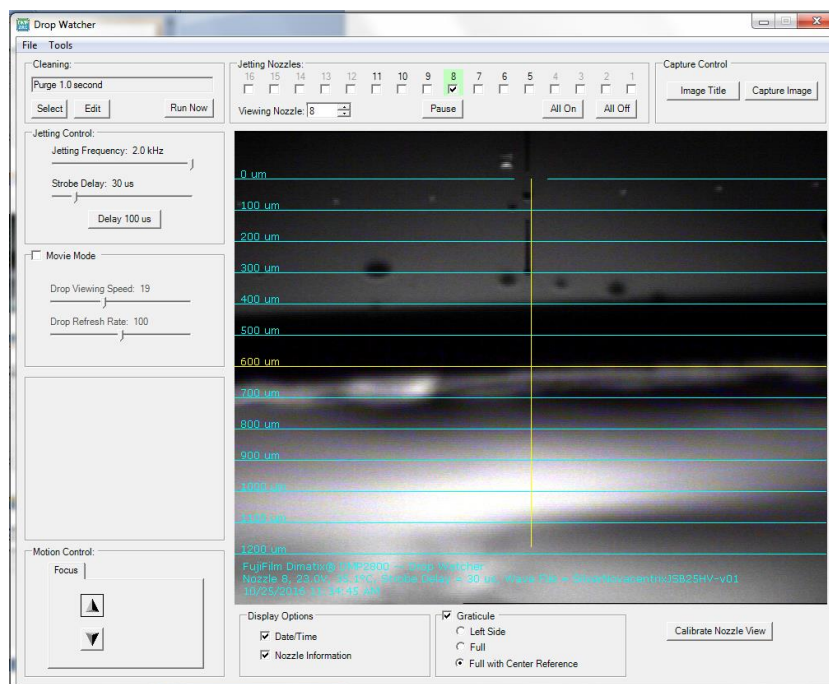
### 4.1.3 Příprava tiskárny

Po splnění všech předešlých podmínek dále následuje nastavení tiskárny. Po zapnutí tiskárna provede samočinnou kalibraci všech pojezdů. Po jeho dokončení je možné vložit cartridge s inkoustem a substrát. Dále následuje nastavení parametrů tisku. Optimalizace podmínek byla provedena již v [36], v této práci byly tyto poznatky dále využity.

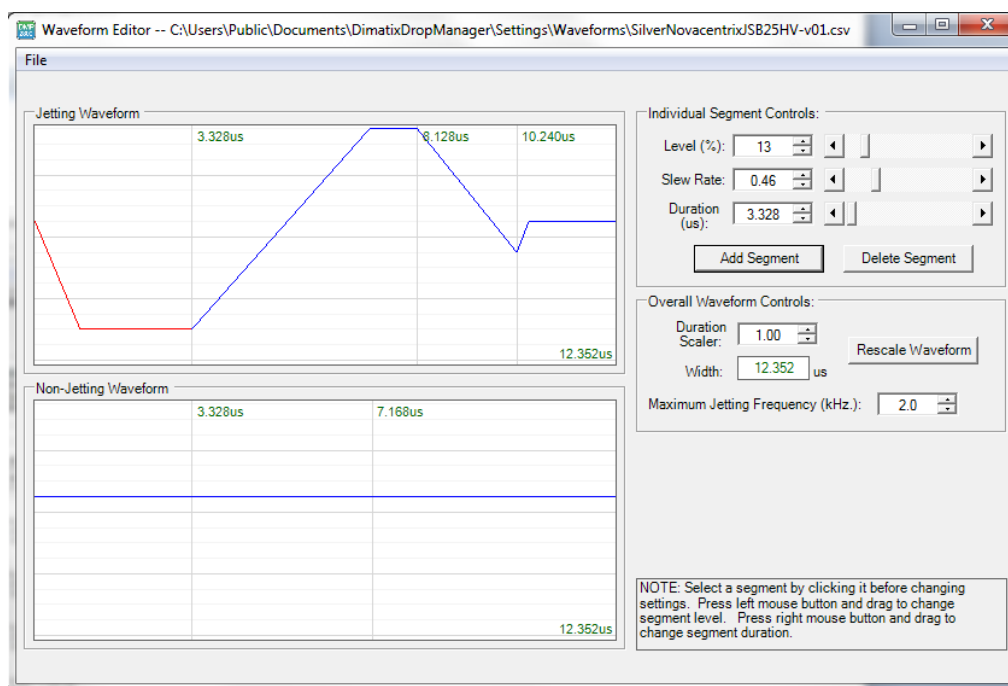
Po vložení inkoustu je vhodné provést čištění trysek a přesvědčit se, zda kapky vylétávají z trysek rovně, požadovanou rychlostí a zda mají správný tvar. Příklady tvarů vylétávajících kapky je na Obr. 17, okno pro kontrolu těchto parametrů pak na Obr. 18. Rychlost, kterou vylétávají kapky lze ovlivnit napětím a frekvencí na tryskách a také teplotou. Profil průběhu napětí na tryskách je zobrazen na Obr. 19. Jedním z důležitých parametrů je také počet trysek, kterými bude proveden tisk. U požitě tiskárny lze nastavit rozsah od 1 až po 16, kdy je možné kombinovat různý počet trysek, vybrané trysky však musí být vždy sousední. Nakonec lze v tomto nastavení určit jaký typ a jak často se bude provádět čištění trysek. V této práci bylo nastaveno čištění před započnutím každého tisku po dobu 0,3 s. Nastavení cartridge bylo pro všechny tištěné struktury a inkousty shodné. Jejich nastavení je na Obr. 20.



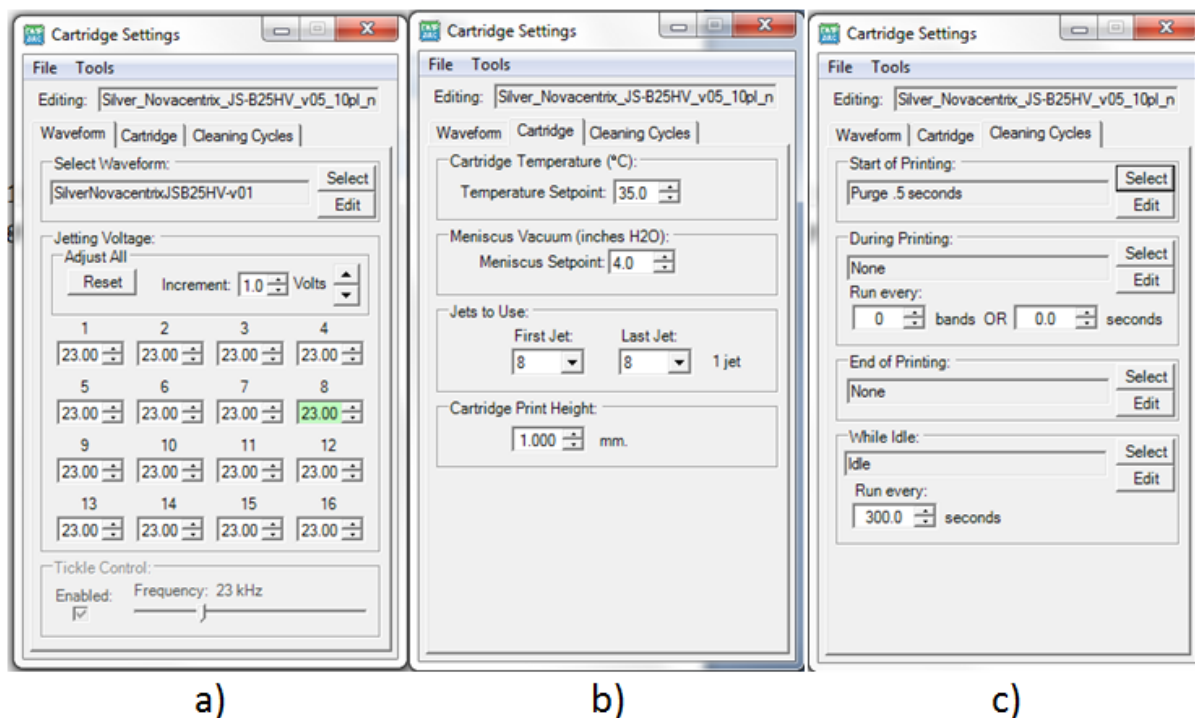
Obr. 17 Příklady tvarů vylétávajících kapky: a) Satelitní kapky, b) Dlouhý krček, c) Ideální tvar kapky



Obr. 18 Okno Drop Watcher pro sledování kapek vylétujících z trysek



Obr. 19 Nastavení napěťového průběhu pro aktivaci trysek



Obr. 20 Podrobné nastavení inkoustu: a) Velikost napětí na jednotlivých tryskách; b) Teplota, Počet použitých trysek a výška cartridge, ve které bude tisknout; c) Typ a četnost čištění cartridge

## 4.2 VÝBĚR INKOSTU A SUBSTRÁTU

Na základě dřívější optimalizace tisku byly vybrány pro navržené struktury pouze některé z možných substrátů a inkoustů. Pro tisk byly zvoleny celkem tři inkousty, dva vodivé: ANP DGP 40LT – 15C, Novacentrix JS-B25HV a izolant SU-8 2002. Vlastnosti vodivých inkoustů jsou blíže popsány v Tab. 6 Přehled vlastností dostupných inkoustů

Vlastnosti inkoustu SU-8 2002:

- Viskozita – 7,5 cP
- Hustota – 1,123 g/mol
- Permitivita – 3,2
- Sintrování – UV + Ohřev na 90 °C

Substráty, na které proběhl tisk, byly vybrány fotopapír, sklo a PET folie. Fotopapír byl po vyzkoušení několika druhů od různých výrobců nakonec vybrán od výrobce print IT, 260 g/m<sup>2</sup>, lesklý o tloušťce 300 μm. Od tohoto výrobce dosahoval dobrých výsledků a má tak dobrou opakovatelnost i bez dodatečné povrchové úpravy. U ostatních byl problém s povrchovou úpravou, kdy se inkoust rozléval a při sintrování rychle žloutl a vrchní lesklá vrstva se oddělovala od zbytku papíru.

Skleněný substrát zastupovaly laboratorní sklíčka o rozměrech 76 x 26 mm a o tloušťce 1 mm. Tento substrát bylo před tiskem nutné nejprve očistit. Provedený postup je uveden v kapitole 4.1.2. Aby byla sklíčka přidržována na podložce tiskárny pod tlakem, byla do tvrdého papíru vyříznuta okénka, do kterých byla sklíčka následně vložena.

PET folie, o rozměrech 215,9 × 279,4 mm a tloušťce 140 μm, byla vybrána od výrobce Novacentrix. Folie jsou dodávány po 20 kusech, jednotlivé kusy jsou prokládány tenkým papírem. Výrobce dodává materiál již s povrchovou úpravou, nebylo tedy třeba jej dodatečně čistit. Další informace o substrátech jsou uvedeny v Tab. 5.

Papír je jistě jednou z nejlevnějších a nejdostupnějších variant při výběru substrátu. V porovnání ostatními flexibilními materiály, jako polyethylen terephtalat (PET), polymide (PI), nebo s pevnými materiály – sklo, kov, keramika je papír jistě nejlevnější volbou. Díky tomu může být snížena i cena celkového výrobku. Nespornou výhodou také je, že papír je ekologicky přívětivý a lze jej jednoduše recyklovat.

Pro Inkjet tisk je však vhodnější namísto běžného papíru použít fotopapír, alespoň 210 g/m<sup>2</sup>. Ten je běžně potažen ještě několika vrstvami, které mu dodávají určitou kvalitativní stálost a charakteristické vlastnosti, jako hladkost a lesklost povrchu, absorpci inkoustu apod. Běžně dostupné fotopapíry jsou také potaženy jednou nebo dvěma vrstvami polyetylenem, který zaručuje fotopapíru ochranu před kapalinami. Dále může být nanášena vrstva průhledné pryskyřice, která chrání papír před fyzickým poškozením. Tyto vrstvy chrání papír před kroucením během tisku, umožňují rychlejší vysychání inkoustu a tvoří velmi hladký povrch. Díky těmto úpravám je fotopapír vhodným substrátem pro tisk nanočásticovým inkoustem.

Při výběru bylo důležité porovnat několik druhů fotopapíru od různých výrobců. U jednotlivých zástupců se sledovaly parametry jako kvalita natištěných motivů, časová stálost a stav po sintrování.

V Tab. 3 jsou uvedeny pozorované vlastnosti u vybraných výrobců. V Tab. 4 pak stav fotopapírů, které byly vystaveny vysokým teplotám.

Jak jsem zmínil výše, byl vybrán fotopapír od výrobce Print IT, dosahoval nejlepších výsledků a zároveň se jednalo o nejlevnější variantu.

	Rozpíjivost inkoustu	Stálost natištěných struktur	1 vrstva	Stav po sintrování
Print IT, Glossy 260 g/m <sup>2</sup>	Malá	Vysoká	Nedostatečná	Lehce zažloutlý
Epson, Premium photo paper, 255 g/m <sup>2</sup>	Malá	Vysoká	Nedostatečná	žlutý, oddělená krycí vrstva
Verbatim Glossy Photo Paper, 200 g/m <sup>2</sup>	Malá	Vysoká	Nedostatečná	Žlutý

Tab. 3 Porovnávané faktory u fotopapírů

Teplotní stálost					
	80 °C	100 °C	120 °C	150 °C	180 °C
Print IT	Bez poškození	Bez poškození	Lehce zažloutlý	Zažloutlý	Žlutý
Epson	Bez poškození	Lehce zažloutlý	žlutý	Žlutý	Žlutý
Verbatim	Bez poškození	Lehce zažloutlý	žlutý	Žlutý	Žlutý

Tab. 4 Stav fotopapírů po teplotním namáhání

Materiál	PEDOT:PSS	DGP 40LT-15C	DGP 40TE-20C	JS-B25HV
Funkční materiál	Polymery	Ag	Ag	Ag
Viskozita [cP]	7~12	10~17	10~17	8
Povrchové napětí	-	35~38	35~38	30~32
Teplota sintrování [°C]	-	120~150	180~200	150~180 °C
Měrný odpor [μΩ*cm]	-	11~12	7	2,8
Obsah pevných částic (wt%)	-	30 – 35	30 – 35	25
Stabilita	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Rozpouštědlo	-	TGME	TGME	Ano
Rozpustnost ve vodě	Ano	-	-	Ano
Výrobce	Orgacon	ANP, Inc.	ANP, Inc.	Novacentrix
Forma použití	Film	Disperze, nanočástice	Disperze	Disperze, nanočástice

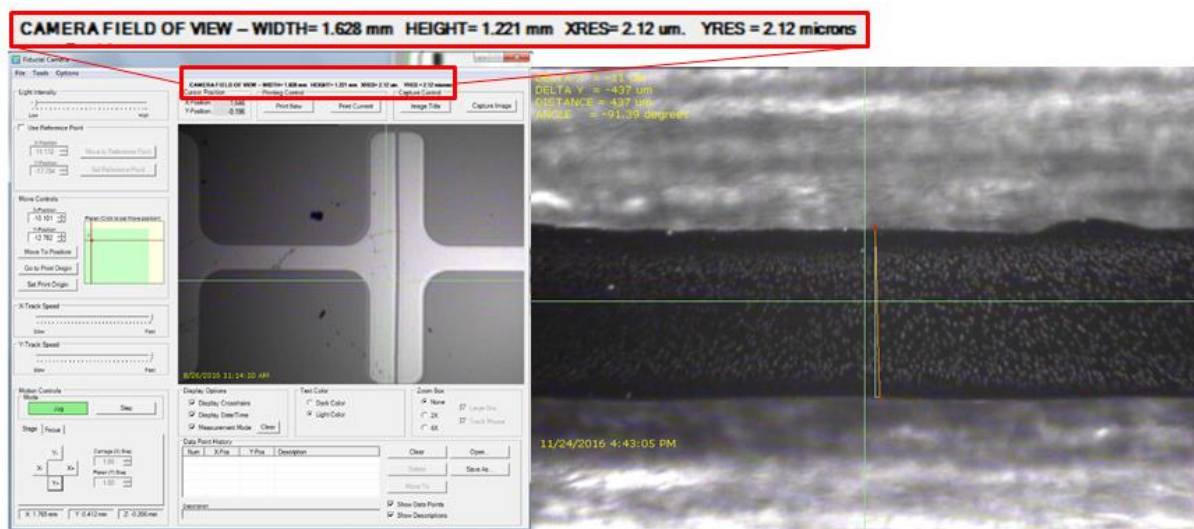
Tab. 5 Přehled vlastností dostupných inkoustů

Materiál	Tloušťka	Flexibilní	Porézní	Transparentní	Vodivý	Dodatečně čišťeno	Výrobce	Typ
Fotopapír	300 μm	A	A	N	N	N	Print IT	A4, 260 g/m <sup>2</sup>
PET	150 μm	A	N	A	N	N	Novacentrix	Novele IJ-220
Sklo	1,1 mm	N	N	A	N	A	Waldemar Knittel	Podložní sklíčko

Tab. 6 Informace o použitých substrátech

## 4.3 MĚŘENÍ ROZMĚRU NATIŠTĚNÝCH STRUKTUR

Po natištění struktur je vhodné zjistit jejich rozměry. Pro tento účel je tiskárna vybavena kamerou, která měření umožňuje. Kamera disponuje rozlišením 2,1  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  a je schopna měřit s přesností 1  $\mu\text{m}$ . Kamera zabírá plochu 1,6 x 1,2 mm, která se zobrazuje na monitoru. Pomocí kamery je také možné měřit tloušťku substrátu pomocí pohybu kamery po ose Z. Postupným zaostřováním lze měřit vzdálenost od nejnižší polohy, nebo lze zvolit počáteční pozici, od které se bude dále odměřovat. Po změření struktury je tedy možné určit, o kolik se rozměry natištěné struktury liší od navržené a lze tak zvolit vhodný postup dosažení požadovaných rozměrů.

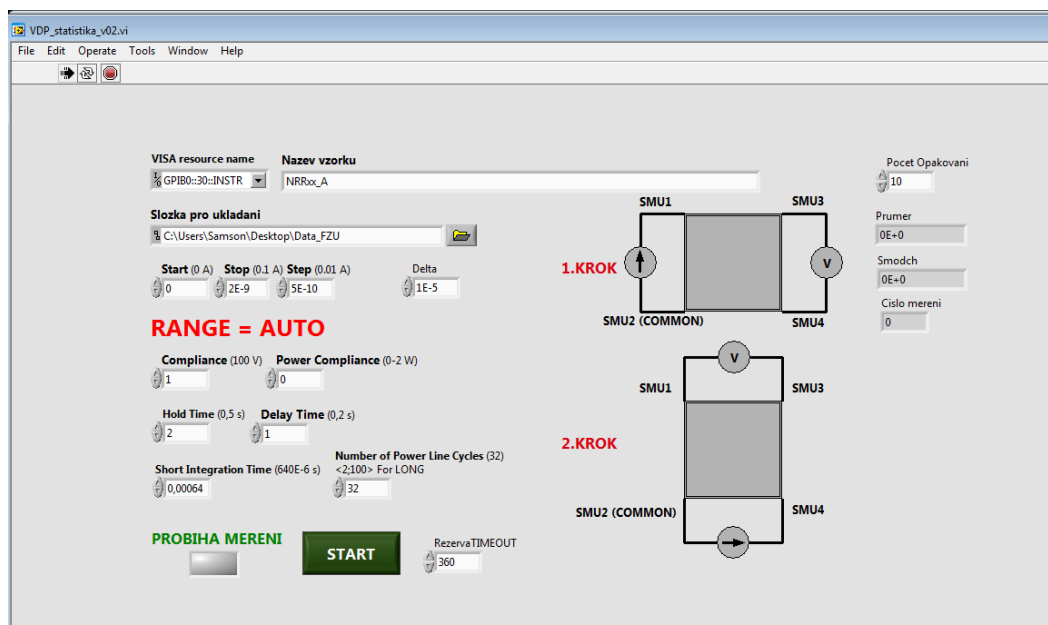


Obr. 21 Měření rozměrů natištěného layoutu pomocí kamery tiskárny: a) software pro ovládání kamery s uvedeným rozlišením, b) Příklad naměřené struktury

## 4.4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ STRUKTUR

### 4.4.1 Měření plošné rezistivity

Měření probíhalo na hrotové stanici Cascade Microtech M150 pro čtyřvodičové měření, Obr. 23. Vodiče byly zapojeny do měřicího přístroje Agilent 4156C. K měření byla použita Labview aplikace VDP, Obr. 22, dostupná v laboratoři na ovládacím PC, určená přímo pro měření těchto struktur. Program obsahuje algoritmus, který vyhodnocuje naměřené výsledky včetně elektrické nesymetrie vzorku. Měření se vždy provádělo desetkrát na jednom vzorku, aby byla zaručena dostatečná důvěryhodnost naměřených hodnot. Z těchto naměřených hodnot byla nakonec vypočítaná výsledná hodnota ze všech vzorků.



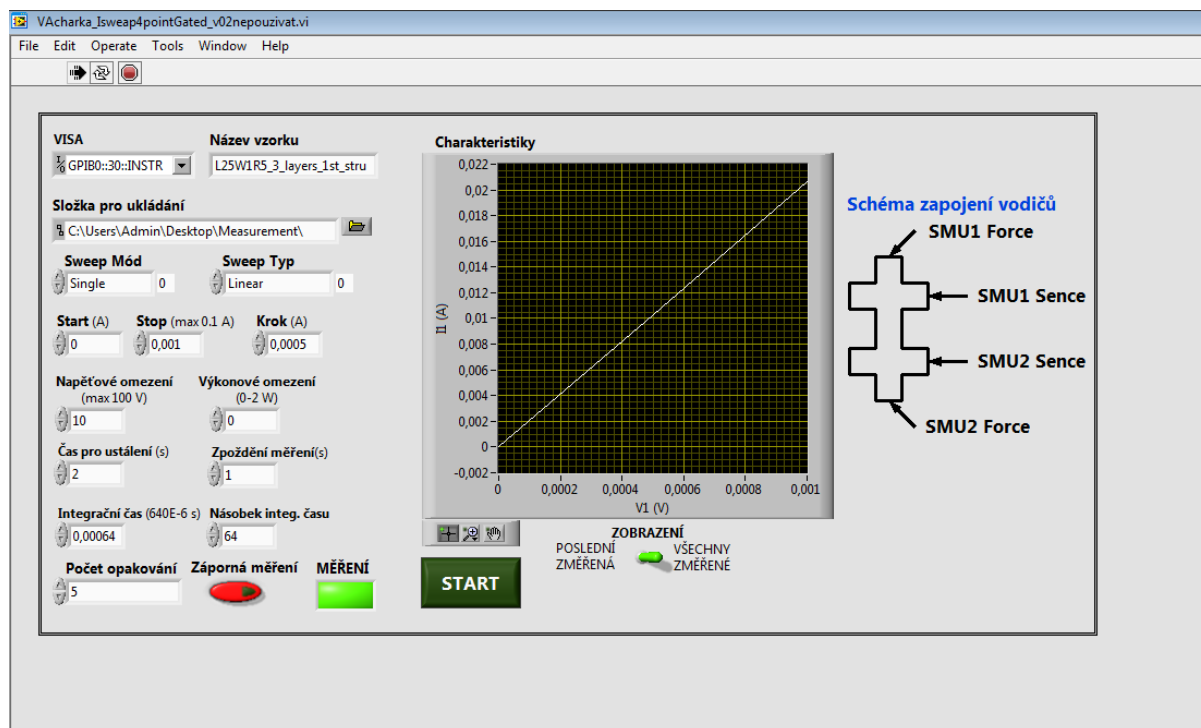
Obr. 22 Ukázka softwaru použitého pro měření plošného odporu

#### 4.4.2 Měření elektrického odporu

Pro měření byla použita Labview aplikace, Obr. 24, dostupná na laboratorním PC ovládající hrotovou stanici, Obr. 21. Součástí softwaru je okno s grafem, kde je možné kontrolovat, zda se měřený vzorek chová lineárně (což bylo v tomto případě očekáváno) nebo ne, což může upozornit na chybu měření. Ta může být způsobena špatným dotekem elektrod k vzorku, mechanickým narušením natištěné struktury, nebo z důvodů nekvalitně provedeného tisku. Měření probíhalo čtyřvodičovou metodou. Pro dosažení větší spolehlivosti výsledků, byl každý vzorek podroben pěti měřením, ze kterých byla vypočtena průměrná hodnota odporu.



Obr. 23 Měřicí hrotová stanice



Obr. 24 Ukázka softwaru použitého pro měření odporu struktur rezistorů

## 4.5 REALIZOVANÉ STRUKTURY

V této práci se zaměřuji na tisk základních elektrických součástek, které jsou realizovatelné pomocí Inkjet technologie. Pro tisk byly vybrány rezistor a kapacitor. Pro každou součástku byly natištěny jednotlivé struktury, u kterých se měřili jejich vlastnosti, a dále byla navržena struktura jednoduché aplikace dané součástky, kde se využívá jejich vlastností. Ještě před samotnou realizací tisku těchto struktur byl natištěn motiv Van der Pauw. Pomocí toho jsem byl schopen ověřit hodnotu plošného odporu, která byla důležitá pro stanovení hodnot a rozměrů rezistorů.

### 4.5.1 Tisk struktury Van der Pauw na vybrané substráty

Vlastnosti motivu Van der Pauw jsou blíže popsány v kapitole 3.1. V této kapitole jsou popsány vlastnosti tisku tohoto motivu na různých substrátech. Pro tisk tohoto motivu byly navrženy dva motivy s různými rozměry, aby lépe ověřili vlastnosti inkoustu. Layouty jsou zobrazeny na Obr. 25.



Obr. 25 Struktury pro měření plošného odporu inkoustu

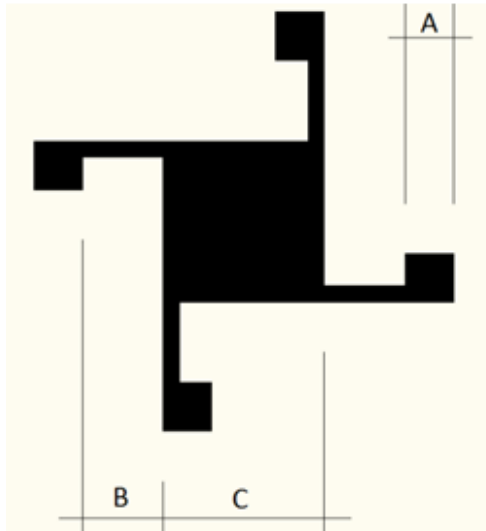
#### 4.5.1.1 Tisk Van der Pauw na papír

Při tisku na fotopapír byl cartridge vyhříván na 35 °C, aby bylo dosaženo optimální viskozity inkoustu. Podložka se substrátem byla vyhřívána na 45 °C. Tím je zajištěna dostatečná teplota pro odpařování rozpouštědla a zasychání inkoustu. S přibývajícím počtem vrstev bylo ovšem zapotřebí delší doby



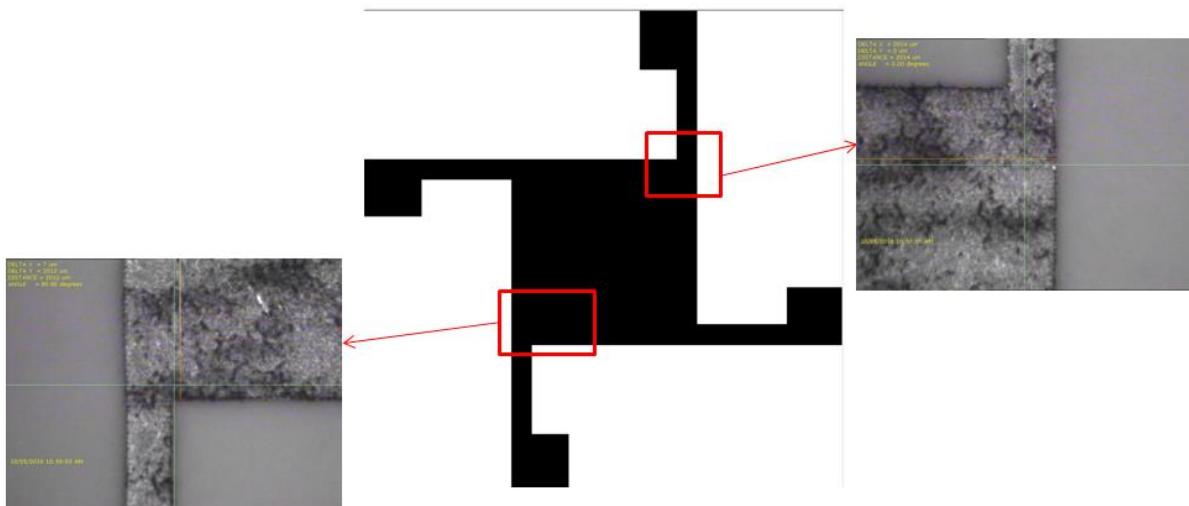
k vyschnutí inkoustu před tiskem další vrstvy. Rozteč kapek při tisku tohoto motivu byl 25  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozlišení 1016 dpi, frekvence tryskání kapek byla nastavena na 2 kHz.

Na Obr. 26 jsou zobrazeny rozměry použitých layoutů pro měření plošného odporu. Na Obr. 17 jsou pak vidět části layoutu zachycené kamerou tiskárny.



Rozměr	mm	
A	0,6	0,6
B	1	1
C	2	5

Obr. 26 Rozměry motivu Van der Pauw

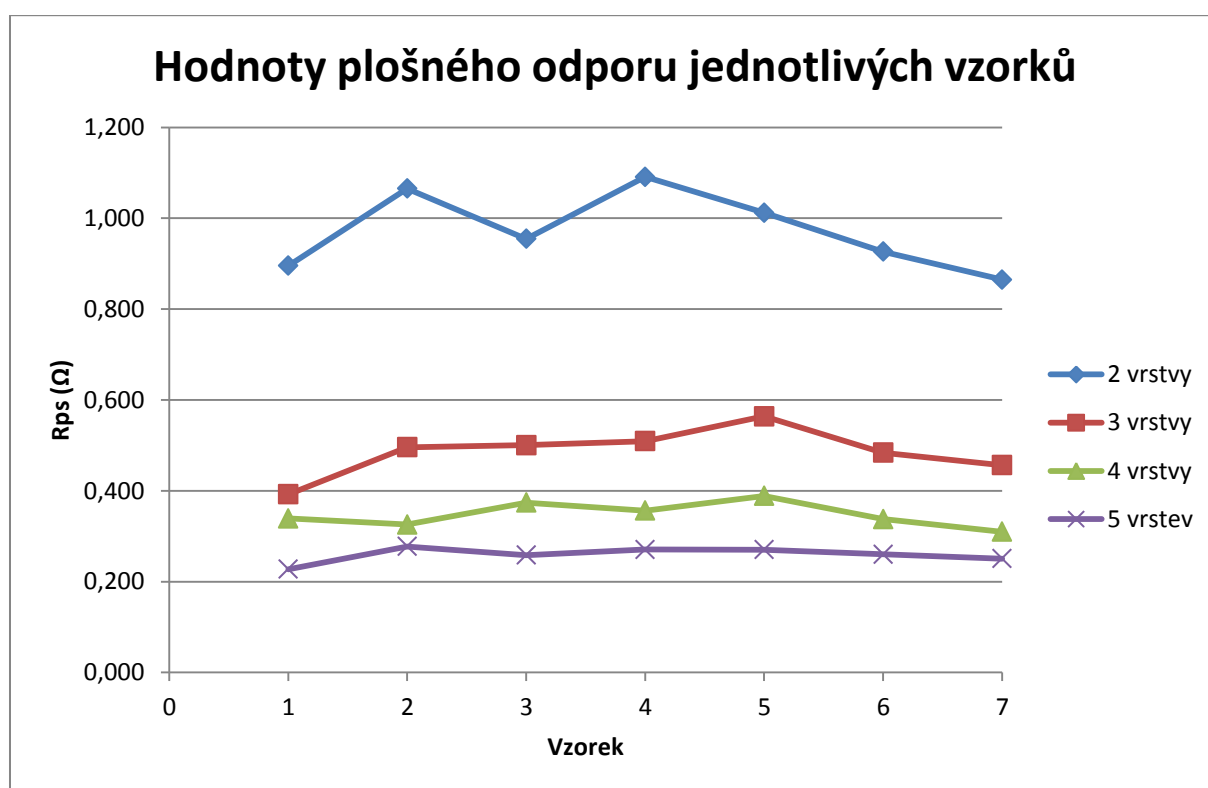


Obr. 27 Detaily natištěné struktury zachycené fiducial kamerou

V Tab. 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty plošného odporu jednotlivých vzorků rozdělených podle počtu natištěných vrstev. V tabulce nejsou uvedeny hodnoty pro jednu vrstvu. Je to z toho důvodu, že jedna vrstva byla natolik tenká a nehomogenní, že nebylo možné měřit její elektrické vlastnosti.

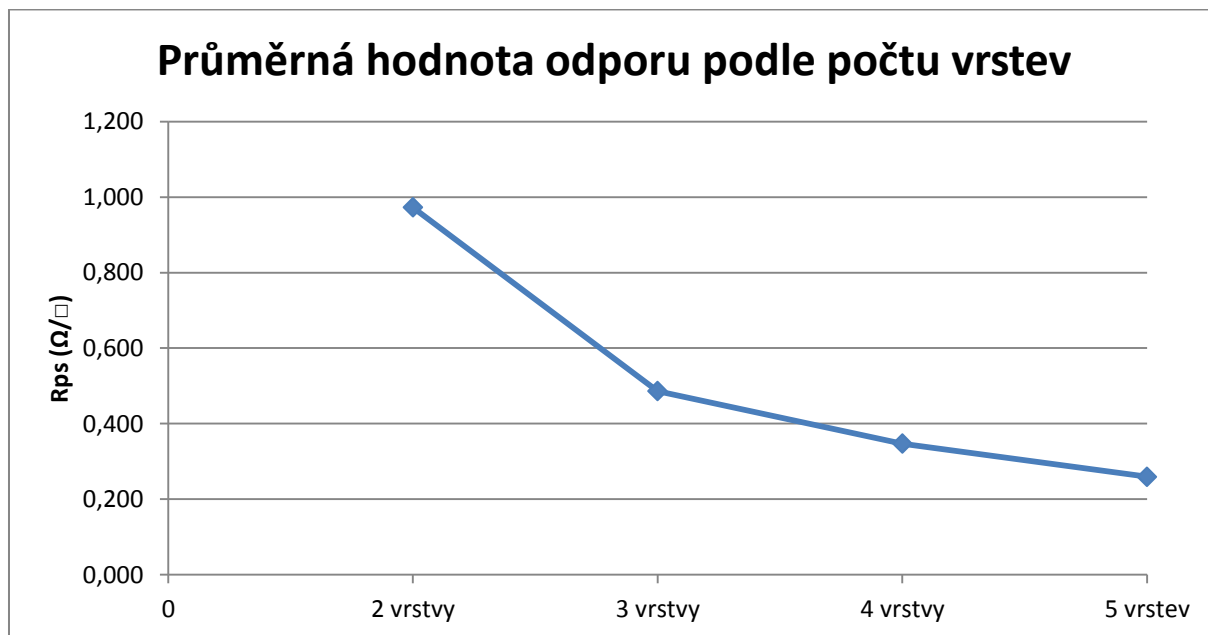
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
2 vrstvy	0,895	1,065	0,955	1,091	1,012	0,926	0,865	0,973
3 vrstvy	0,392	0,496	0,500	0,509	0,564	0,484	0,456	0,486
4 vrstvy	0,339	0,326	0,374	0,356	0,389	0,338	0,310	0,347
5 vrstev	0,227	0,277	0,258	0,271	0,270	0,260	0,251	0,259

Tab. 7 Výsledky měření plošného odporu ( $\Omega/\square$ ) na fotopapíru



Obr. 28 Hodnoty plošného odporu jednotlivých vzorků

Z Obr. 29 názorně vyplývá, že s větším počtem vrstev klesá plošný odpor. To potvrzuje naše předpoklady. Pokud bude natištěno více vrstev, bude také nanášeno více vodivého materiálu. Po vysintrování tak zde bude větší množství stříbra schopné přenášet elektrický náboj. Lze to tedy přirovnat k většímu průměru vodiče u konvenční elektroniky.



Obr. 29 Průměrná hodnota odporu podle počtu vrstev

#### 4.5.1.2 Tisk Van der Pauw na PET folii

Pro realizaci dalších struktur byly i na tento substrát použity hodnoty z předchozího měření. Pro ověření by však bylo vhodné provést tisk a následnou charakterizaci této struktury na každý substrát zvlášť, aby se optimalizovaly vlastnosti dále tištěných struktur a měly námi požadované vlastnosti.

#### 4.5.2 Tisk rezistoru na vybrané substráty

Vlastnosti rezistoru a elektrického odporu jako fyzikální veličiny jsou blíže popsány v kapitole 3.2.

Po naměření plošného odporu a získání hodnot byly navrženy layouty rezistorů. Pro menší hodnoty odporu, tj. asi od 5 do 50  $\Omega$ , byly navrženy lineární odpory. Pro hodnoty od 100 do 200  $\Omega$  byly z důvodů velké plochy potřebné k tisku navrženy meandrové odpory.

Nejprve byly zvoleny hodnoty elektrického odporu, kterých jsme chtěli dosáhnout. S pomocí zjištěných hodnot plošného odporu byly dopočítány rozměry jednotlivých rezistorů. K výpočtu byly použity vzorce 1) a 2), kdy nejprve byl vypočítán počet čtverců potřebný k dosažení požadovaného odporu při známém plošném odporu a dále byla vypočítána plocha rezistoru. Přičemž vždy byla jedna hodnota délky nebo šířky fixní. Z výsledků pak byly vybrány nejvhodnější varianty.

$$n = \frac{L}{W} \quad 10)$$

$$R = n * R_s \quad 11)$$

Kde R je elektrický odpor,

n je počet čtverců,

$R_s$  je plošný odpor

L je délka čáry

W je šířka čáry

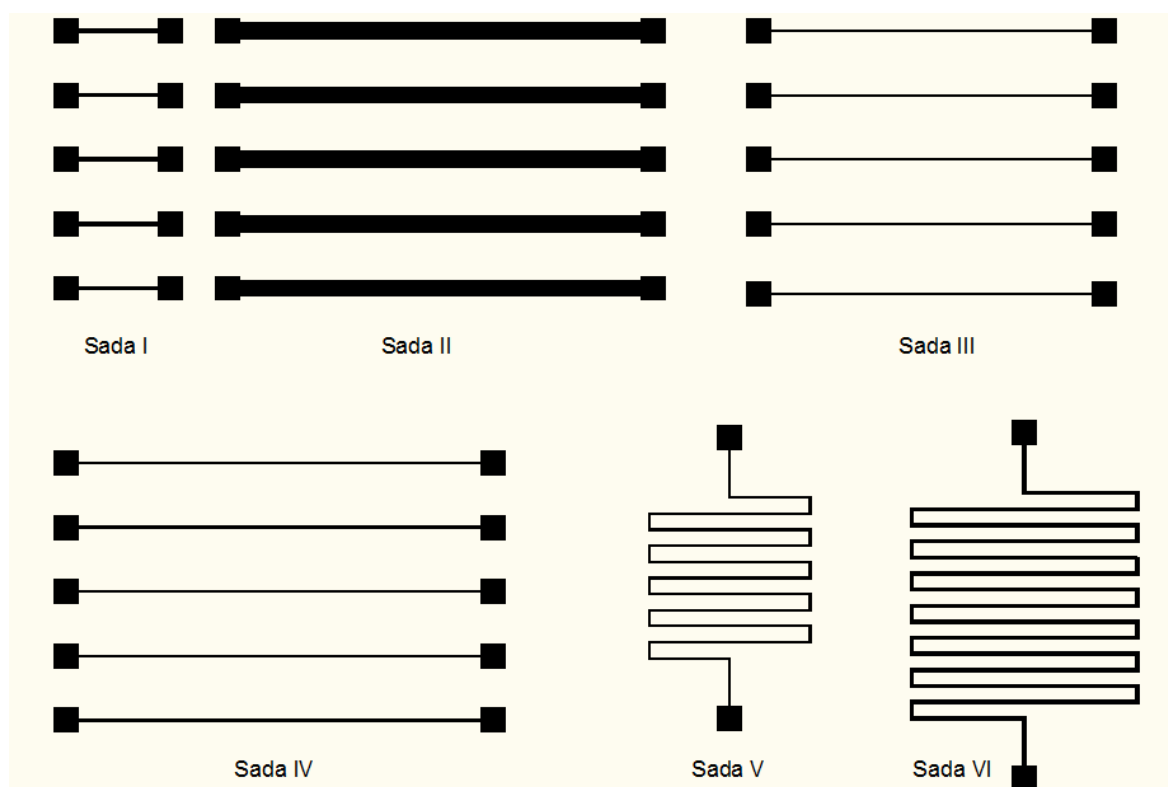
Celkem bylo natištěno 5 vzorů lineárních motivů a 3 meandrové. Ukázka některých lineárních motivů je na Obr. 30, všechny navržené motivy pak na Obr. 31. Při tisku meandrových vzorů je vhodné umísťovat layout tak, aby byly delší části umístěny po směru tisku. Tiskárna tak bude lépe využita a nebude docházet k předčasnému opotřebení pojezdů tiskárny. Výsledné rozměry všech layoutů jsou uvedeny v Tab. 9.



Obr. 30 Sada struktur rezistorů s označením délky, šířky odporové části a předpokládaného odporu

Sada	Délka v mm	Šířka čáry v mm
I	5	0,2
II	25	1
III	20	0,08
IV	25	0,1
V	100	0,1
VI	200	0,2

Tab. 9 Rozměry tištěných rezistorů



Obr. 31 Navržené struktury s různou hodnotou elektrického odporu

#### 4.5.2.1 Tisk rezistorů na papír

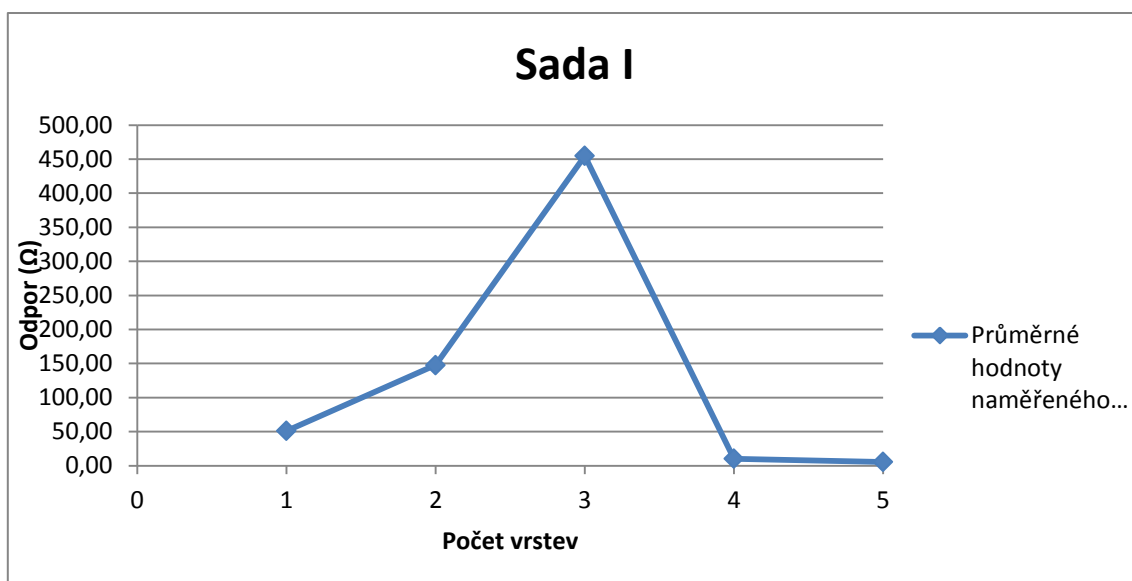
Pro tisk rezistorů byl použit stejný fotopapír jako v případě Van der Pauw. Podmínky tisku byly taktéž podobné jako v předchozím bodě. Cartridge s inkoustem byl vyhříván na 35 °C, podložka se substrátem byla vyhřívána na 45 °C, rozlišení tisku 1016 dpi (25 μm rozteč kapek). Po tisku byl papír vložen do sušárny, kde byl inkoust sintrován při teplotě 120 °C dvě hodiny. S opakovatelností není u tohoto substrátu žádný problém, lze tedy tisknout více struktur najednou.

Na fotopapír byl realizován pouze tisk motivu, který je na Obr. 15 Sada struktur rezistorů s označením délky, šířky odporové části a předpokládaného odporu avšak byl realizován od jedné do pěti vrstev, aby se ověřilo, zda má tloušťka, resp. počet vrstev vliv na výslednou hodnotu odporu.

V Tab. 10 jsou uvedeny hodnoty včetně dopočteného průměru vybraných motivů tištěných od 1 do pěti vrstev.

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [Ω]	40,56	35,04	60,26	78,43	41,22	51,10
2 Vrstva [Ω]	29,36	135,85	159,01	236,73	177,53	147,70
3 Vrstva [Ω]	79,71	882,23	254,45	1033,27	24,31	454,79
4 Vrstva [Ω]	11,07	9,56	10,01	9,45	10,61	10,14
5 Vrstvy [Ω]	3,40	7,31	7,31	5,35	3,91	5,46

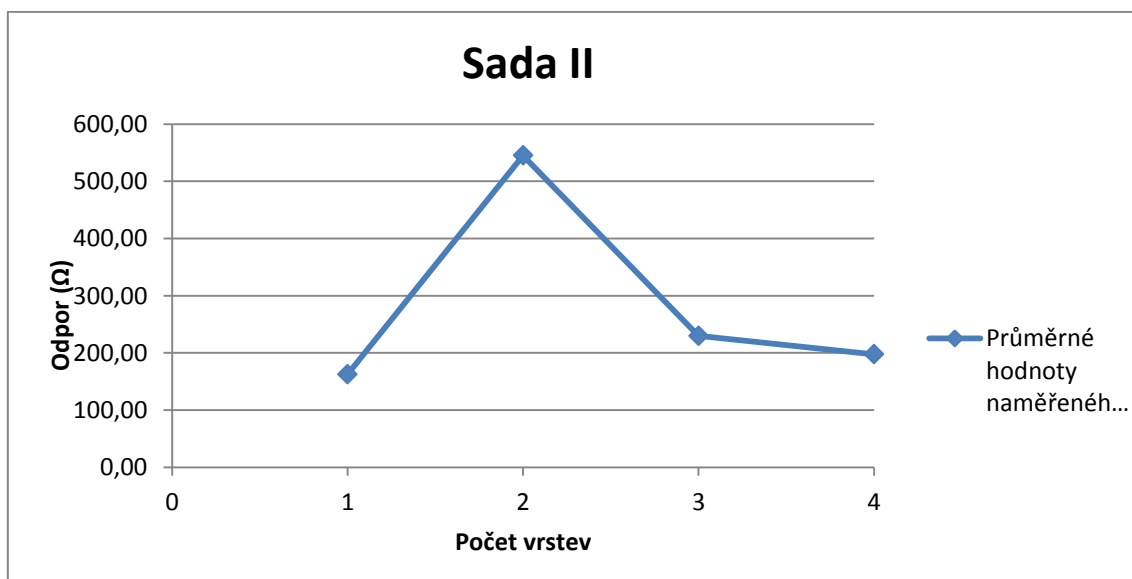
Tab. 10 Tabulka naměřených hodnot odporu (Ω) sady I



Obr. 32 Lineární odpory sada I

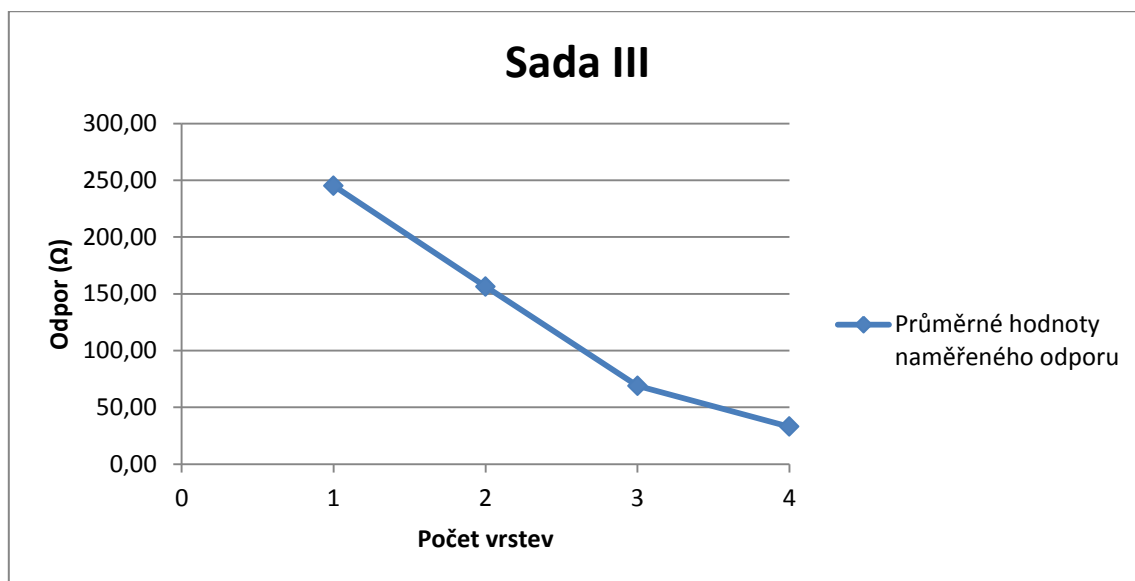
Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [Ω]	161,38	198,84	131,25	177,48	143,95	162,58
2 Vrstva [Ω]	247,22	297,61	1134,11	193,02	853,98	545,19
3 Vrstva [Ω]	179,36	200,12	212,42	329,99	226,57	229,69
4 Vrstva [Ω]	142,20	282,58	118,07	150,22	295,58	197,73
5 Vrstva [Ω]	37,73	134,23	195,55	56,17	190,00	122,74

Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot odporu (Ω) sady II



Obr. 33 Lineární odpory sada II

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	223,37	241,01	291,37	235,11	234,60	245,09
2 Vrstvy [ $\Omega$ ]	123,10	199,50	231,22	118,97	108,95	156,35
3 Vrstvy [ $\Omega$ ]	55,56	48,92	102,21			68,89
4 Vrstvy [ $\Omega$ ]	29,86	31,56	43,57	29,80	30,02	32,96
5 Vrstvy [ $\Omega$ ]	20,43	21,85	29,96	23,67	23,00	23,78

Tab. 12 Tabulka naměřených hodnot odporu ( $\Omega$ ) sady III

Obr. 34 Lineární odpory sada III

#### 4.5.2.2 Tisk rezistorů na PET folii

Na PET folii probíhal tisk za stejných podmínek jako na fotopapír. Cartridge s inkoustem byl vyhříván na 35 °C, podložka se substrátem byla vyhřívána na 45 °C, rozlišení tisku 1016 dpi (25  $\mu$ m rozteč kapek), frekvence 2 kHz. Sintrování proběhlo za teploty 120 °C po dobu dvou hodin. Po dokončení sintrování je vhodné nechat substrát vychladnout ještě v sušárně, nebo pokud se vyndá ještě teplý, je dobré ho překrýt papírem a zatížit, aby zůstal rovný a nedocházelo ke větším ohybům, které po zchladnutí zůstanou. Na tento substrát bylo natištěno 5 motivů lineárních rezistorů a 3 meandrové. Taktéž byly pro ověření natištěny 3 vybrané motivy rezistorů od jedné do pěti vrstev.

Při měření na tomto substrátu musela být kladena větší pozornost na jemnost při doteku elektrod, aby nedošlo k poškození natištěné struktury. Elektrody jsou na koncích ostré, mohlo by tak dojít seškrábnutí inkoustu z povrchu folie, což může ovlivnit výsledek měření. Vzorky byly tištěny opět jednou vrstvou.

V Tab. 13 jsou uvedeny hodnoty odporu jednotlivých motivů. V tabulkách 14 – 16 pak průměrné hodnoty odporu sad odporů I, II a III. Grafy k jednotlivým tabulkám jsou v příloze Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami.

Sada\Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
I	22,83	25,71	22,22	21,87	21,35	22,80
II	32,38	32,82	33,44	29,22	30,87	31,74
III	102,92	102,98	120,62	104,74	103,77	107,00
IV	112,85	117,86	114,89	117,20	116,12	115,79
V	612,71	611,29	604,81	591,87	606,72	605,48
VI	853,19	849,75	947,69	943,20	-	898,46

Tab. 13 Hodnoty odporu ( $\Omega$ ) natištěných rezistorů rozdělených podle čísla vzorku a motivu

Sada I					
Počet Vrstev	1	2	3	4	5
Hodnota odporu [ $\Omega$ ]	22,80	13,70	12,73	9,87	7,63

Tab. 14 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady I dle počtu vrstev

Sada II					
Počet Vrstev	1	2	3	4	5
Hodnota odporu [ $\Omega$ ]	31,74	22,45	20,96	12,58	9,48

Tab. 15 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady II dle počtu vrstev

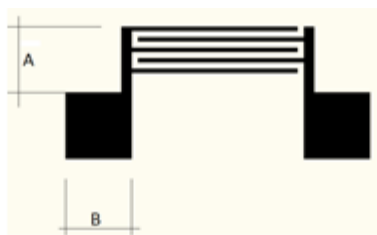
Sada III					
Počet Vrstev	1	2	3	4	5
Hodnota odporu [ $\Omega$ ]	107,00	54,43	39,67	26,08	22,15

Tab. 16 Průměrné hodnoty odporu lineárních odporů Sady III dle počtu vrstev

### 4.5.3 Tisk kapacitoru na různé substráty

Detailněji jsou vlastnosti kapacitoru popsány v kapitole 3.3. Kapacitor je jednou ze základních součástek v elektronice. Proto byla také zvolena k realizaci v této práci. Kapacitor je možné realizovat pomocí Inkjet tisku dvěma způsoby. Jde o samotný typ kapacitoru – lze realizovat jak deskový kapacitor MIM (Metal – Insulator – Metal), tak interdigitální kapacitor. V případě deskového kapacitoru je nejprve natištěna první vrstva vodivým inkoustem, který tvoří jednu z elektrod. Na tu je následně natištěna vrstva dielektrika, která vytvoří mezeru mezi dvěma elektrodami. Poté je natištěna 3. vrstva v podobě druhé elektrody. Po natištění každé vrstvy je zapotřebí její sintrování. Výsledná kapacita je dána jako u běžného deskového kapacitoru vzdáleností elektrod, jejich plochou a permitivitou nanoseného dielektrika. Interdigitální kapacitor lze natisknout jen dvěma vrstvami. Nejprve se natiskne první vrstva, kdy se tisknou obě elektrody najednou. Každá elektroda se skládá z několika prstů a mezer. Elektrody jsou zasunuty proti sobě. Důležité je, aby elektrody nebyly nikde zkratované, teprve pak lze využít tohoto motivu jako kapacitoru, nikoliv jako rezistoru. Je tedy nezbytné dbát na kvalitu při tisku. Všechny vodivé prsty musejí mít shodnou šířku a tloušťku, také mezera by měla být ve všech místech shodná. Po vysintrování této vrstvy je nanesena vrstva rezistivního materiálu, která působí jednak jako dielektrikum a uchová po dlouhou dobu stejné vlastnosti kapacitoru. Celkem bylo navrženo 7 motivů, ze kterých bylo vybráno jen několik k tisku. Rozměry jednotlivých kapacitorů jsou uvedeny v Tab. 17.





Rozměr	mm							
A	2	2	2	2	2	2	2	2
B	2	3	4	6	2	2,6	3,8	6,2
Délka prstu	5	5	5	5	10	10	10	10
Šířka Prstu	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Šířka mezery	0,2	0,3	0,64	1,11	0,2	0,3	0,6	1,2

Tab. 17 Rozměry tištěných kapacitorů

V této práci nebyl kapacitor analyzován z hlediska svých vlastností vzhledem ke svým rozměrům, kdy by se zjišťovala změna kapacity se změnou rozměrů jednotlivých layoutů. Zde byl kladen důraz spíše na to, zda lze použít takto natištěný kapacitor jako senzor. Byl tedy navržen kapacitor vhodných rozměrů a dále se zjišťovalo, zda po změně vlastností dielektrika dojde i ke změně kapacity.

#### 4.5.3.1 Tisk kapacitoru na PET folii

Pro realizaci byl vybrán motiv interdigitálního kapacitoru. A to především z důvodu jednodušší realizace, kdy není potřeba upravovat povrch natištěného materiálu dielektrika a tisk probíhá pouze ve dvou krocích. Pro tisk kapacitoru byl použit stejný fotopapír jako při tisku rezistorů. Jak již bylo zmíněno, je důležité, aby natištěné struktury kapacitoru měly přesně dané rozměry. Šířka mezer i prstů interdigitálního kapacitoru dosahuje několika desítek  $\mu\text{m}$ , při špatném sesazení může snadno dojít k propojení obou elektrod. Nejprve byly natištěny elektrody. Podmínky tisku byly jako v předchozích případech. Teplota cartridge s inkoustem byla  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teplota substrátu byla  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rozlišení tisku 1016 dpi. Po natištění této vrstvy proběhlo sintrování v sušárně na  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  po dobu dvou hodin. Poté byla na takto vytvořené motivy nanášena vrstva dielektrika. V tomto případě byl použit materiál SU-8 2002. Jde o transparentní kapalinu, kterou jsou překryty prsty kapacitoru. Vytvrzování tohoto materiálu lze provádět pod UV světlem, teplem nebo jejich kombinací. [39] Kapalina byla naplněna do cartridge a natištěna tiskárnou stejně jako vodivý inkoust. Cartridge byl vyhříván taktéž na  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , substrát na  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aby došlo k plnému překrytí, bylo zde zapotřebí většího rozlišení, konkrétně 1270 dpi, čemuž odpovídá rozteč kapek  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Po nanášení bylo tuto vrstvu potřeba také vytvrdit. To probíhalo ve třech krocích: nejprve byl substrát s inkoustem vyhříván po dobu pěti minut na  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Poté byl přemístěn do UV komory, kde byl pod UV světlem vytvrzován 10 minut. Nakonec byl opět vyhříván, tentokrát 5 minut na  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . K ohřevu byla použita laboratorní plotýnka P-LAB SD160. Opakovatelnost je u tohoto substrátu bezproblémová, bylo tedy možné tisknout najednou několik kusů.

## 4.6 DALŠÍ NAVRŽENÉ STRUKTURY

### 4.6.1 Tenzometr

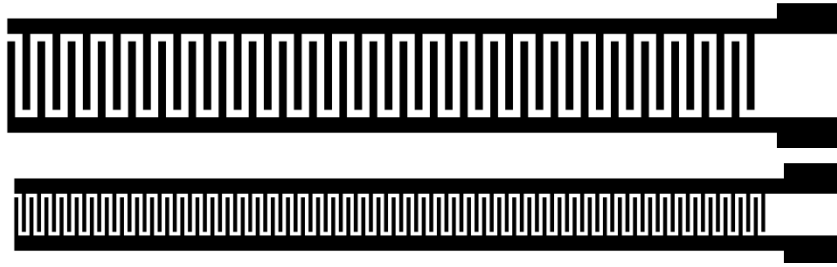
Po tisku a charakterizaci rezistorů byl dalším krokem návrh aplikace, kde se využije jeho odporových vlastností. Tenzometr je využíván jako senzor ohybu pevného materiálu, kdy dochází ke změně tvaru tenzometru a tím i jeho velikosti odporu. V tomto případě by bylo možné natisknout tenzometr jak na papír, tak folii. Ty by se pak vodným způsobem připevnili na konkrétní místo, v našem případě například kovovou destičku a po připojení k měřicímu zařízení by bylo možné sledovat změnu odporu, popřípadě i velikost průhybu destičky. Tenzometr by po vhodné úpravě povrchu mohl být natištěn i na samotnou destičku. V praxi by to ale bylo na jedno účelné použití. U papíru a folie by stačilo pouze dodat vrchní krycí vrstvu, která by zaručila vzorku dlouhodobě zachování jeho vlastností a takto vytvořený tenzometr může být okamžitě použit i komerčně.

### 4.6.2 Senzor výšky hladiny

Interdigitální struktury lze využít mnoha způsoby. V základní verzi poslouží jako kapacitor, což je jedna z částí této práce. Různými modifikacemi délky a krycí senzitivní vrstvy lze získat mnoho variant senzorů. Jedním takovým je senzor výšky hladiny, který jsem zvolil jako návrh aplikace kapacitoru v této práci. Tento senzor je tvořen kapacitorem s velkým počtem prstů na každé elektrodě. Tím je dosaženo zvětšení délky kapacitoru a tím i jeho kapacity. Pro zvýšení odolnosti senzoru je vhodné jej zatavit do krycí folie, která by neměla ovlivnit jeho kapacitní vlastnosti. Po ponoření takového senzoru do nádoby s tekutinou a připojení senzoru k přístroji k měření kapacity lze odečítat změnu kapacity senzoru. Ta se bude měnit s měnící se výškou hladiny. Kapalina ovlivní dielektrické vlastnosti v části, která je ponořena do kapaliny a tím i velikost celkové kapacity. Pokud by byla k senzoru vytvořena vhodná aplikace, bylo by možné přesně určit výšku hladiny v dané nádobě. Rozměry použitého motivu jsou uvedeny v Tab. 18. Navržený layout je na Obr. 35.

Rozměry (mm)	A	B
Délka prstu	10	5
Šířka prstu	1	0,5
Šířka mezery	1	0,5
Šířka vodiče	2	2
Kontakt	4x8	4x8

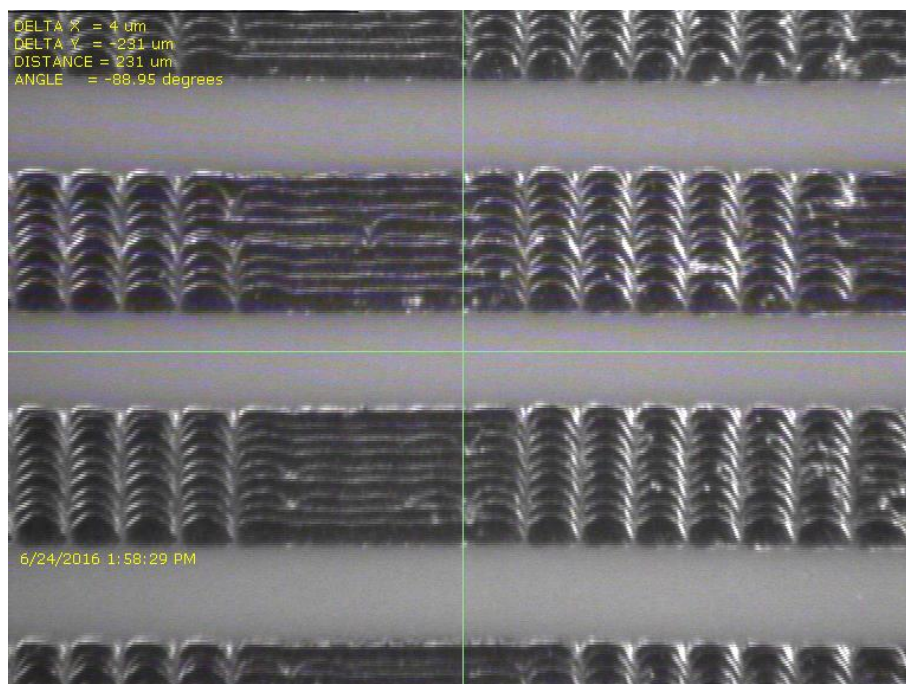
Tab. 18 Rozměry navržených senzorů výšky hladiny



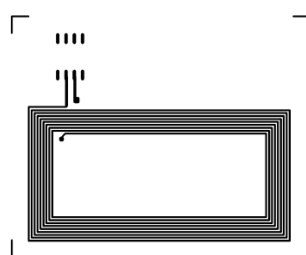
Obr. 35 Návrhy layoutů senzoru výšky hladiny

#### 4.6.3 NFC anténa

Jednou ze struktur, které byly tištěny, byla i NFC anténa. Jako substrát byl použit fotopapír. Realizace bezchybných struktur však byla neúspěšná. Během tisku docházelo k mnoha tiskovým chybám. Docházelo k přerušování struktur, zvlnění okrajů, někdy nebyla plocha homogenní a někdy nebyla část struktury vůbec natištěna. Optimalizaci tisku bylo věnováno mnoho času, jako důsledek těchto chyb byl nakonec určen špatný stav inkoustu. Tisk probíhal ještě před tím, než byl inkoust filtrován. V inkoustu se tak zřejmě nacházely shluky pevných částic již tak velké, že docházelo k ucpávání trysek a tím i k problémům během tisku. Na obr. 36 je ukázán jeden z možných jevů, který se při realizaci NFC vyskytl. Další obrázky jsou přiloženy v příloze Nepovedené struktury. Na Obr. 37 navržený layout NFC antény.



Obr. 36 Příklad poruchy tisku NFC antény

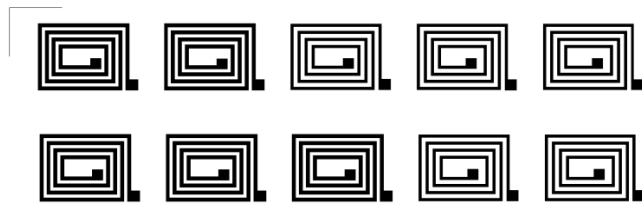


Obr. 37 Layout NFC antény

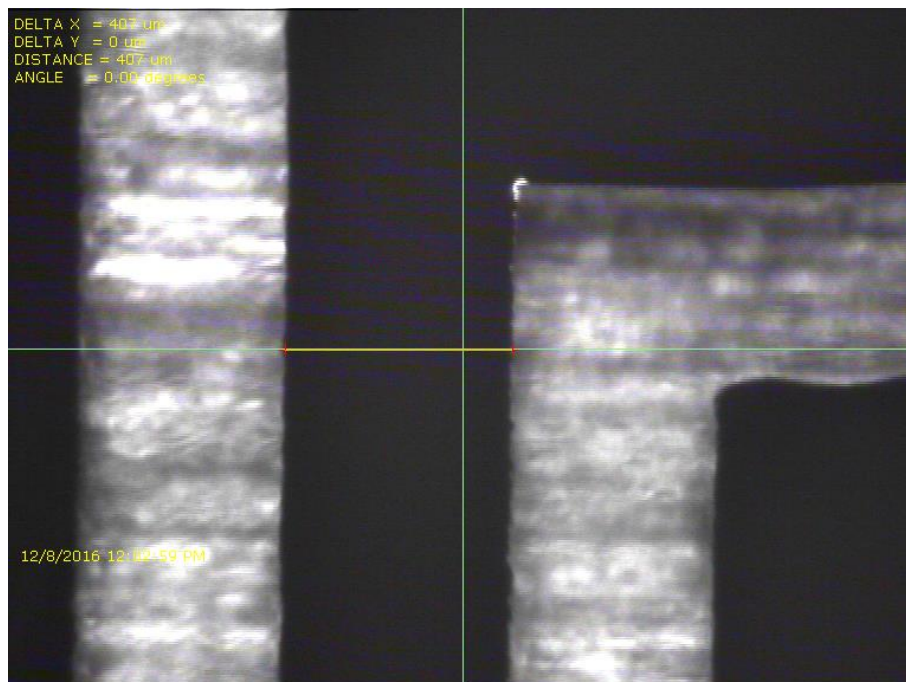
#### 4.6.4 Induktor

Jako další elektronická součástka k tisku byl vybrán induktor, jehož layout je na obr. 38. Na Obr. 39 je pak snímek z kamery tiskárny. Induktor byl vytištěn na sklo a PET folii. Celkem bylo natištěno 20 vzorků na skle i na folii. Tisk probíhal za stejných podmínek jako u ostatních motivů. Cartridge s inkoustem byl vyhříván na 35 °C, podložka se substrátem byla vyhřívána na 45 °C, rozlišení tisku 1016 dpi (25 µm rozteč kapek). Sintrovány byly vzorky na 120 °C po dobu dvou hodin.

Problémem byla následná charakterizace. Použit byl přístroj Hameg programable LCR brudge HM8118. Bylo možné použít pouze ručního měření, čímž docházelo k rychlému poškození vzorků seškrábnutím inkoustu. K optimalizaci měření vzorku by bylo vhodné připevnit na kontakty vodiče, kterým by se následně mohl opakovaně připojit měřicí přístroj. Naměřené hodnoty však v tomto případě nebylo možné považovat za věrohodné. Při měření indukčnosti cívek nedocházelo k ustálení hodnoty, kterou by bylo možné zaznamenat. Docházelo zde zřejmě k podobnému jevu, jako při charakterizaci kapacitorů, kdy byly vlastnosti vzorků a tím i měřené hodnoty ovlivněny podmínkami v laboratoři.



Obr. 38 Motiv tištěných induktorů



Obr. 39 Snímek induktorů pořízený kamerou tiskárny

#### 4.6.5 Deskový kapacitor

Kromě interdigitálního kapacitoru, kterému je věnována kapitola 4.5.3 byl natištěn i deskový kapacitor, Obr. 40. Oproti interdigitálním kapacitorům je zde zapotřebí provést tisk tří samostatných vrstev. Nejprve byla natištěna první elektroda stříbrným inkoustem, která byla částečně překryta izolačním inkoustem, který slouží jako dielektrikum. Po natištění druhé elektrody se však inkoust začal shlukovat do ostrůvků a nevytvořil jednolitou plochu. Jako dielektrikum byl použit opět inkoust SU-8. Po vysintrování má takto vytvořený povrch příliš velkou povrchovou energii, proto inkoust v další vrstvě začne vytvářet separátní kapky.

Abychom byli schopni vyrobit tento druh kapacitoru, je nutné nejprve optimalizovat úpravu povrchu dielektrického materiálu.



Obr. 40 Deskový kapacitor

## 5 Srovnání výsledků, návrh dalšího postupu

### 5.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A JEJICH POROVNÁNÍ S JIŽ DOSTUPNÝMI

#### 5.1.1 Substráty, na nichž se podařilo dosáhnout kvalitních výsledků

Výsledky, které lze považovat za kvalitativně bezchybné tj. tisk kontinuální čáry bez přerušování, nebo naopak boulí nebo jiných jevů, které by viditelně odlišovaly natištěné struktury od navržených, byly dosaženy pouze u některých substrátů.

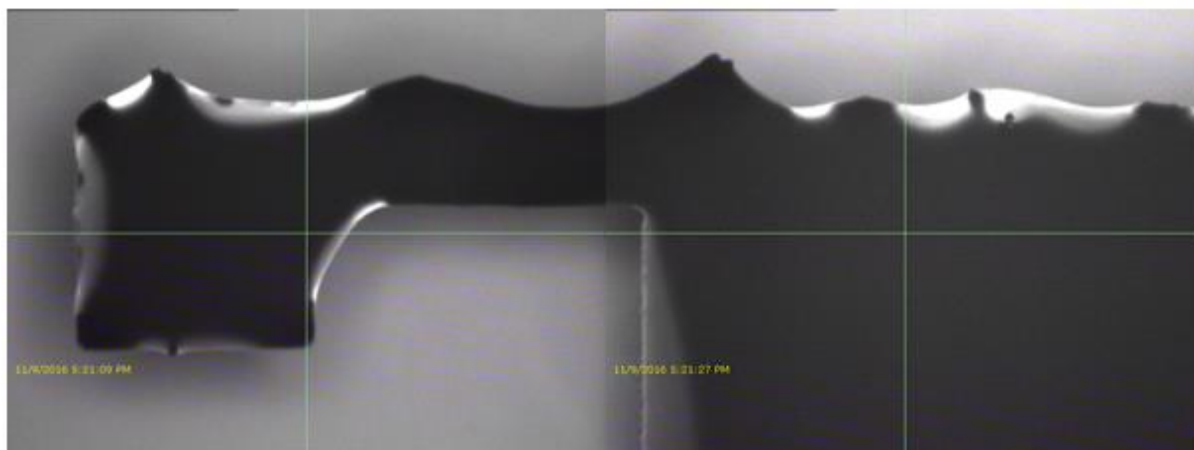
Dobrých výsledků bylo dosaženo při tisku na fotopapír a PET folii. Oba mají již z výroby provedenu úpravu povrchu, která je dostatečná, aby byl tisk kvalitní. Při tisku na fotopapír se chová inkoust stabilně, nedochází k rozpíjení ani naopak shlukování do ostrůvků. Natištěné struktury mají přesné hrany. Dochází pouze k mírnému vsakování, je tedy nutné tisknout minimálně dvě vrstvy, aby byly struktury opravdu vodivé. Při tisku více vrstev je nutné nechat dostatečně vyschnout inkoust před tiskem další vrstvy.

Ještě lépe dopadla PET folie. Po kontaktu inkoustu se substrátem dochází k rychlému zasychání, naopak se zde nemá inkoust kam vsakovat. Díky tomu mají struktury ostré přesné tvary. Již po natištění jedné vrstvy je možné struktury považovat za vodivé. Při nutnosti více vrstev je možné je tisknout téměř okamžitě po dokončení té předchozí.

#### 5.1.2 Substráty, na nichž se je nutné výsledky dále optimalizovat

Neuspokojivých výsledků bylo dosaženo pouze na skleněném substrátu. Sklo bylo čištěno před každým tiskem, nicméně i tak se inkoust na povrchu choval nestabilně. Inkoust sice tvořil jednolitou plochu, natištěné struktury však nebyly ostré a objevovaly se i náhodné boule. Mnohokrát se stalo, že díky těmto jevům došlo ke zkratování elektrod, čímž byl celý vzorek zničený. Tisk malých struktur tak nebylo možné realizovat. Snímky takovýchto struktur jsou uvedeny v příloze Nepovedené struktury.

I přes čištění povrchu skla ultrazvukem v několika roztocích nebyl povrch dokonale vyčištěn, což způsobovalo tiskové chyby. Ukázka, co se může stát po důkladném, nicméně stále nedostatečném čištění, respektive úpravě povrchu substrátu je na Obr. 41.

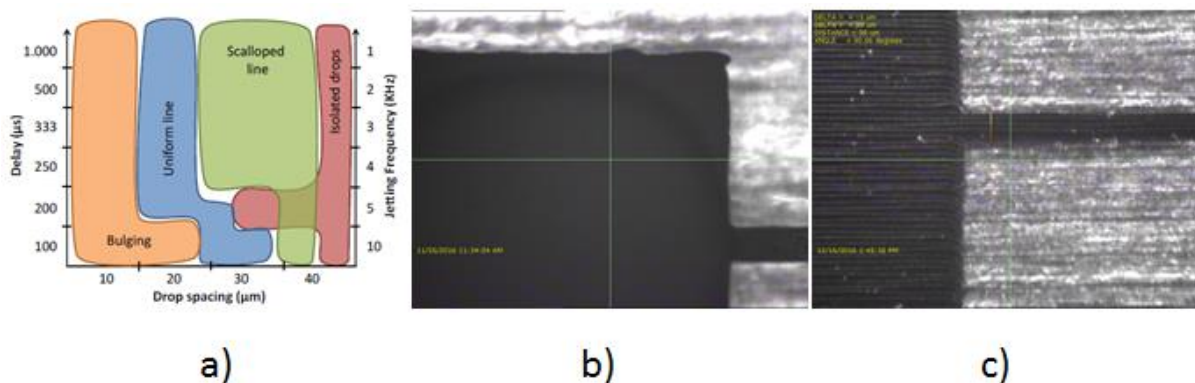


Obr. 41 Příklad rozlévání inkoustu na skleněném substrátu

Pro získání shodných hodnot u navržených struktur bude třeba ještě provést optimalizaci kvality tisku. Jasně to dokazují výsledky z měření lineárních rezistorů. Efekt byl více patrný na fotopapíru. Na něm před tiskem nebylo provedeno žádné čištění, což se v závěru měření ukázalo jako nezbytné. Papír je zabalen v zataveném obalu a okem se zdá naprosto čistý, v mikroskopickém měřítku však úplně čistý nebude a po interakci nečistot s inkoustem můžou být v konečném důsledku ovlivněny elektrické vlastnosti tištěných motivů.

Dalším možným vysvětlením by mohla být homogenita papíru. Při testech bylo zjištěno, že použitý fotopapír s gramáží 260 g/m<sup>2</sup> je prodyšný. Nemusí být však ve všech místech naprosto stejně. Při tisku se inkoust má možnost vsakovat. Pokud se však vsakuje nerovnoměrně, můžou tím být také ovlivněny elektrické vlastnosti motivů.

Při tisku na PET folii se u natištěných struktur objevil efekt „skládání mincí“. Jde o nežádoucí efekt, kdy inkoust netvoří na substrátu jednodílnou plochu, ale vypadá jako složený z několika vrstev, Obr. 42. Tento efekt lze odstranit dvěma způsoby: zvětšit rozlišení (resp. zmenšit vzdálenost kapek), nebo zvýšit frekvenci tryskání kapek. Při zvětšení rozlišení dojde i ke zvětšení potřebného času k tisku struktur. Není tedy vhodné použít tuto variantu pro větší struktury. Zvýšením frekvence se odstraní efekt skládaných mincí, výrazně se však zvýší pravděpodobnost, že dojde k ucpávání trysek během tisku, čímž může být ohrožena kvalita tisku. Pro optimalizaci je tedy nezbytné provést několik zkušebních testů a nalézt rovnováhu, kdy již bude tento efekt potlačen, ale nebude ohrožena kvalita tisku.



Obr. 42 a) Závislost frekvence tryskání a vzdálenosti kapek; b) Jednotlivá plocha inkoustu - sklo; c) Efekt skládaných mincí - PET

## 5.2 NAVRŽENÍ DALŠÍHO POSTUPU

V této práci byl popsán tisk struktur převážně jednou vrstvou, resp. jedním materiálem. Pro dosažení dalšího pokroku by bylo vhodné vytvářet struktury z více druhů inkoustů. Po dosažení a odladění takového postupu by bylo možné realizovat OLED struktury.

Pro dosažení dobrých výsledků i na skleněném substrátu je důležité nalézt vhodnou metodu čištění. Dosavadní postup může být brán jako základ, který je třeba doplnit závěrečným krokem. Tím by mohla být kombinace generátoru ozonu a UV světla. Po této proceduře by měl být povrch ještě dočištěn a mohla by tím být upraveny i povrchová energie.

Na základě znalostí získaných v průběhu této bakalářské práce bych doporučoval ověřit vlastnosti více vrstevných struktur. Již víme, že lze tisknout více vrstev jedním materiálem. Následně bych se pokusil realizovat funkční aplikace z více jak dvou vrstev.

Po optimalizaci vlastností jednotlivých součástek, které byly tištěny v této práci, navrhuji dále využít jejich vlastnosti ve vzájemné kombinaci. Bylo by tak možné vyrobit jednoduché RC, LC nebo RLC články.





## 6 Závěr

V rámci této práce jsem studoval využití technologie materiálového tisku pro přípravu elektronických struktur. Seznámil jsem se s materiálovou inkjet tiskárnou elektricky vodivých inkoustů Fujifilm Dimatix DMP 2831, který je umístěn v laboratoři nanolitografie katedry mikroelektroniky FEL ČVUT.

Provedl jsem rešerši dostupné literatury zabývající deposicí vodivých materiálů. Zejména jsem se pak soustředil na práce, kde byl využíván Inkjet tisk. Provedl jsem porovnání konvenční elektroniky s organickou a uvedl příklady jejich využití.

Na základě získaných vědomostí jsem provedl popis procesu tisku metodou Inkjet a popsal technologický průběh. Popsal jsem procedury, které je doporučeno provést před samotným tiskem. Uvedl jsem postupy přípravy inkoustu pro provedení kvalitního tisku. Dále jsem popsal přípravy substrátů, které jsou nezbytné k dosažení kvalitních výsledků tisku. Tomu je věnována první část kapitoly 4.

Druhá část je věnována realizaci základních elektronických součástek pomocí Inkjet tisku. Nejprve jsem provedl ověření vlastností použitých inkoustů. Pro tisk jsem jako základ zvolil rezistor, dále pak kapacitor. Úspěšně se podařilo realizovat navržené struktury na fotopapír a PET folii. Při tisku byly pořizovány obrázky natištěných struktur, aby bylo možné provést porovnání dosažených výsledků na různých substrátech. Obrázky jsem dále zpracoval do samotného dokumentu této práce. Obrázky jsou umístěny v příloze Ukázky realizovaných struktur.

U natištěných struktur jsem dále provedl charakterizaci jejich elektrických vlastností. Výsledky jsem zpracoval a uvedl k jednotlivým strukturám. Výsledky všech provedených měření jsem zpracoval do tabulek a vynesl do grafů. Vše jsem zpracoval do samostatného dokumentu, které jsou v příloze Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami.

Ze získaných výsledků jsem navrhl další možné struktury, které by vycházely z vlastností realizovaných vzorků.

V kapitole 5 jsem provedl shrnutí získaných výsledků a navrhl další možné postupy ke zkvalitnění a tiskového postupu, získání kvalitních výsledků a možné realizaci dalších elektronických součástek.



## 7 Použitá literatura a zdroje

- [1] R. Bansal, “Coming Soon to a Wal-Mart Near You,” in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003, vol. 45, no. 6, pp. 105–106.
- [2] H. Tseng, “Scaling of Inkjet-Printed Transistors using Novel Printing Techniques,” *UC Berkeley*, 2011.
- [3] D. Redinger, S. Molesa, S. Yin, R. Farschi, and V. Subramanian, “An ink-jet-deposited passive component process for RFID,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 51, no. 12, pp. 1978–1983, 2004.
- [4] M. Jung, J. Kim, J. Noh, N. Lim, C. Lim, G. Lee, J. Kim, H. Kang, K. Jung, A. D. Leonard, J. M. Tour, and G. Cho, “All-Printed and roll-to-roll-printable 13.56-MHz-operated 1-bit RF tag on plastic foils,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 57, no. 3, pp. 571–580, 2010.
- [5] W. a MacDonald, M. K. Looney, D. MacKerron, R. Eveson, R. Adam, K. Hashimoto, and K. Rakos, “Latest advances in substrates for flexible electronics,” *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 15, no. 12, pp. 1075–1083, 2007.
- [6] S. K. Volkman, S. Molesa, B. Mattis, P. C. Chang, and V. Subramanian, “Inkjetted organic transistors using a novel pentacene precursor,” *Flex. Electron. Device Technol.*, vol. 769, pp. 369–374, 2003.
- [7] D. Huang, F. Liao, S. Molesa, D. Redinger, and V. Subramanian, “Plastic-Compatible Low Resistance Printable Gold Nanoparticle Conductors for Flexible Electronics,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 150, no. 7, p. G412, 2003.
- [8] A. Hodgson, “The role of paper in the future of printed electronics,” *2nd Int. Work. Collab. over Pap. Digit. Doc. CoPADD London Novemb.*, vol. 2011, pp. 3–6, 2011.
- [9] K. Finkensteller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*. 2010.
- [10] “RFID využití.” [Online]. Available: <http://www.arduino8.cz/lekce-33-arduino-a-modul-ctecky-rfid-125khz/>.
- [11] “Organic Electronics Association.” [Online]. Available: <http://www.oe-a.org/home>. [Accessed: 28-Apr-2016].
- [12] C. R. Newman, C. D. Frisbie, D. A. Da Silva Filho, J. L. Brédas, P. C. Ewbank, and K. R. Mann, “Introduction to organic thin film transistors and design of n-channel organic semiconductors,” *Chemistry of Materials*, vol. 16, no. 23, pp. 4436–4451, 2004.
- [13] M. J. Schöning and A. Poghosian, “Recent advances in biologically sensitive field-effect transistors (BioFETs).,” *Analyst*, vol. 127, no. 9, pp. 1137–1151, 2002.
- [14] G. C. Jensen, C. E. Krause, G. a Sotzing, and J. F. Rusling, “Inkjet-printed gold nanoparticle electrochemical arrays on plastic. Application to immunodetection of a cancer biomarker protein.,” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 13, no. 11, pp. 4888–4894, 2011.
- [15] N. Y. Shim, D. A. Bernards, D. J. Macaya, J. A. DeFranco, M. Nikolou, R. M. Owens, and G. G. Malliaras, “All-plastic electrochemical transistor for glucose sensing using a ferrocene mediator,” *Sensors*, vol. 9, no. 12, pp. 9896–9902, 2009.
- [16] M. Medina-Sánchez, C. Martínez-Domingo, E. Ramon, S. Miserere, a Alcalde-Aragonés, J. Carrabina, and a Merkoçi, “Inkjet Printed Fet for Biosensing Applications,” *16th Int. Conf. Miniaturized Syst. Chem. Life Sci.*, pp. 1837–1839, 2012.
- [17] E. R. i Garcia, “Inkjet Printed Microelectronic Devices and Circuits,” no. September, 2014.
- [18] H. Kipphan, “Handbook of Print Media,” *Handb. Print Media*, p. 1173, 2001.
- [19] B. J. de Gans, P. C. Duineveld, and U. S. Schubert, “Inkjet Printing of Polymers: State

- of the Art and Future Developments,” *Adv. Mater.*, vol. 16, no. 3, pp. 203–213, 2004.
- [20] T. W. Kelley, P. F. Baude, C. Gerlach, D. E. Ender, D. Muyres, M. A. Haase, D. E. Vogel, and S. D. Theiss, “Recent progress in organic electronics: Materials, devices, and processes,” *Chemistry of Materials*, vol. 16, no. 23, pp. 4413–4422, 2004.
- [21] B. Kang, W. H. Lee, and K. Cho, “Recent advances in organic transistor printing processes,” *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 5, no. 7, pp. 2302–2315, 2013.
- [22] M. Singh, H. M. Haverinen, P. Dhagat, and G. E. Jabbour, “Inkjet printing-process and its applications,” *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 6, pp. 673–685, 2010.
- [23] A. Teichler, J. Perelaer, and U. S. Schubert, “Inkjet printing of organic electronics – comparison of deposition techniques and state-of-the-art developments,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 1, no. 10, p. 1910, 2013.
- [24] J. Lim, J. Kim, Y. J. Yoon, H. Kim, H. G. Yoon, S. N. Lee, and J. Kim, “All-inkjet-printed Metal-Insulator-Metal (MIM) capacitor,” in *Current Applied Physics*, 2012, vol. 12, no. SUPPL. 1.
- [25] Y. Liu, T. Cui, and K. Varahramyan, “All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique,” *Solid. State. Electron.*, vol. 47, no. 9, pp. 1543–1548, 2003.
- [26] B. J. Kang, C. K. Lee, and J. H. Oh, “All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate,” *Microelectron. Eng.*, vol. 97, pp. 251–254, 2012.
- [27] V. Montilla, E. Ramon, and J. Carrabina, “Frequency scan technique for inkjet-printed chipless sensor tag reading,” in *2010 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems, ICECS 2010 - Proceedings*, 2010, pp. 1100–1103.
- [28] J. Jang, “Displays develop a new flexibility,” *Materials Today*, vol. 9, no. 4, pp. 46–52, 2006.
- [29] G. H. Gelinck, H. E. a Huitema, E. van Veenendaal, E. Cantatore, L. Schrijnemakers, J. B. P. H. van der Putten, T. C. T. Geuns, M. Beenhakkers, J. B. Giesbers, B.-H. Huisman, E. J. Meijer, E. M. Benito, F. J. Touwslager, A. W. Marsman, B. J. E. van Rens, and D. M. de Leeuw, “Flexible active-matrix displays and shift registers based on solution-processed organic transistors,” *Nat. Mater.*, vol. 3, no. 2, pp. 106–110, 2004.
- [30] S. E. Molesa, S. K. Volkman, D. R. Redinger, A. F. Vornbrock, and V. Subramanian, “A high-performance all-inkjetted organic transistor technology,” *IEDM Tech. Dig. IEEE Int. Electron Devices Meet. 2004.*, pp. 1072–1074, 2004.
- [31] “Sintering,” 2016. [Online]. Available: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/sintrovani.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/sintrovani.html).
- [32] J. P. A. Martins, “Design and Fabrication by Inkjet Printing of Electrodes for Electromyography,” 2013.
- [33] “Sintering 2,” 2016. [Online]. Available: [http://www.ltu.se/cms\\_fs/1.5838!/fafc1546.pdf](http://www.ltu.se/cms_fs/1.5838!/fafc1546.pdf).
- [34] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.novacentrix.com/>.
- [35] K. Instruments, “Performing van der Pauw Sheet Resistance Measurements Using the Keithley S530 Parametric Tester,” no. 3180, 2012.
- [36] M. Závěský, *Příprava a charakterizace tištěných elektronických struktur Preparation and characterisation of printed electronic structures*. 2016.
- [37] M. Závěský, “Základní bezpečnostní pravidla pro obsluhu inkjetového depozičního systému Dimatix DMP 2800,” 2015.
- [38] FUJIFILM DIMATIX INC, “FUJIFILM Dimatix Ink Tutorial,” 2008.
- [39] P. Epoxy and N. Photoresist, “SU-8 2000 Permanent Epoxy Negative Photoresist PROCESSING GUIDELINES FOR ;,” 2015.
- [40] “amoled.” [Online]. Available: <http://electronics.howstuffworks.com/oled1.htm>.

- [41] “Sigma-Aldrich,” 483095 ALDRICH. [Online]. Available: [http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/483095?lang=en&region=CZ&gclid=CjwKEAajwguu5BRDq8uSKhaKIzDkSJACQ7WJllzyXNOKYadTwemrjtfw7IWe4RADC2Gv25WvZ0utm0xoClzPw\\_wcB](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/483095?lang=en&region=CZ&gclid=CjwKEAajwguu5BRDq8uSKhaKIzDkSJACQ7WJllzyXNOKYadTwemrjtfw7IWe4RADC2Gv25WvZ0utm0xoClzPw_wcB). [Accessed: 06-Jan-2015].





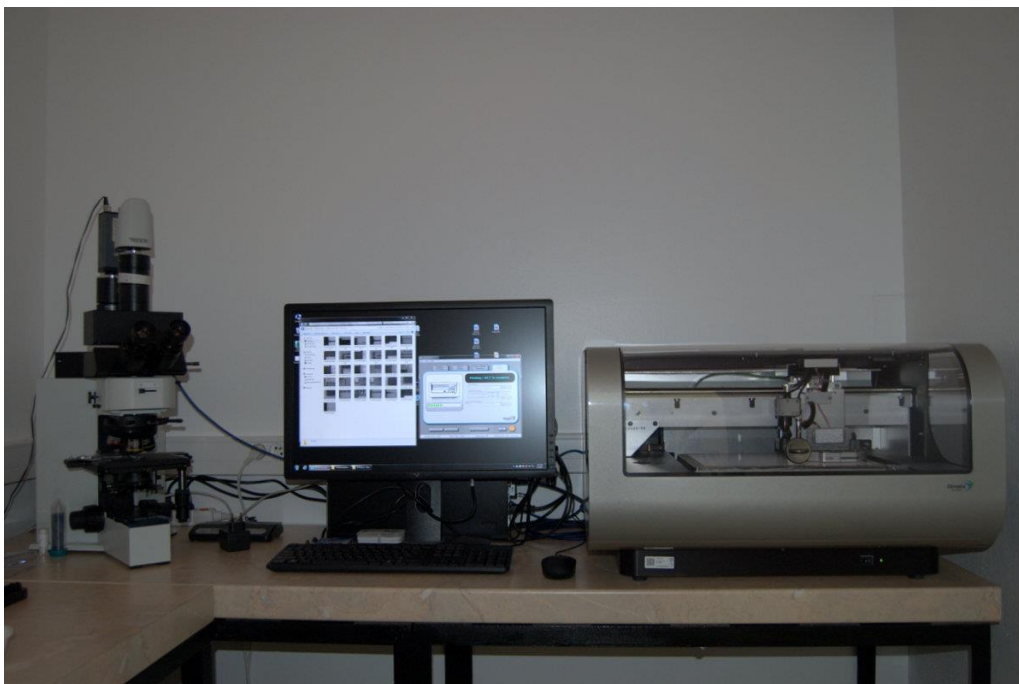


## Seznam Příloh

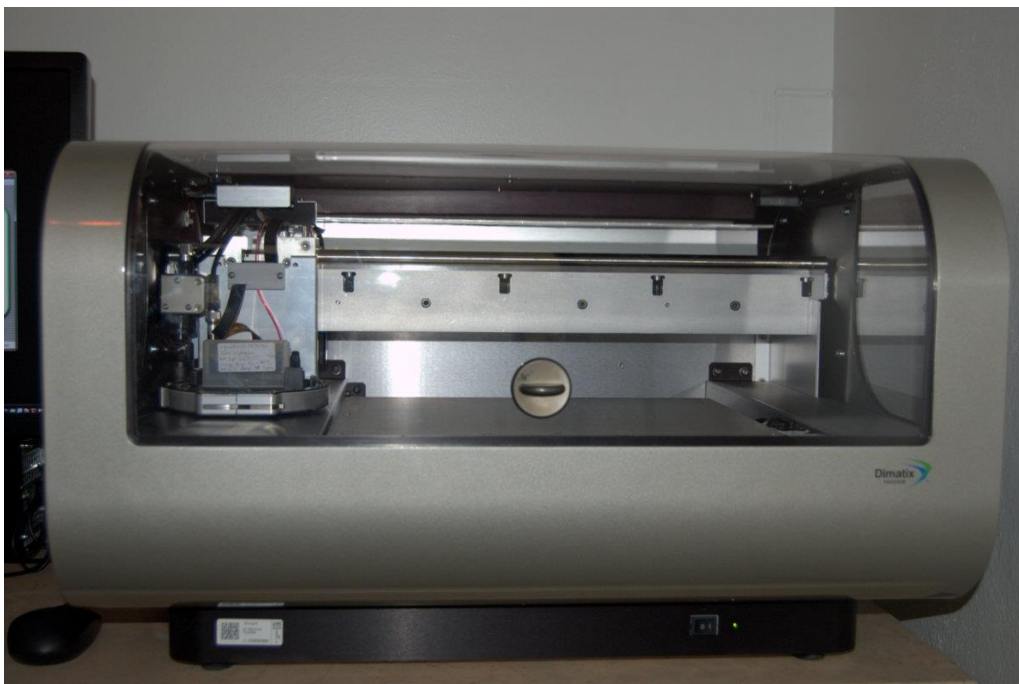
- E) Vybavení laboratoře
- F) Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami
- G) Struktury tištěné až 5 vrstvami
- H) Ukázky realizovaných struktur

# Vybavení laboratoře

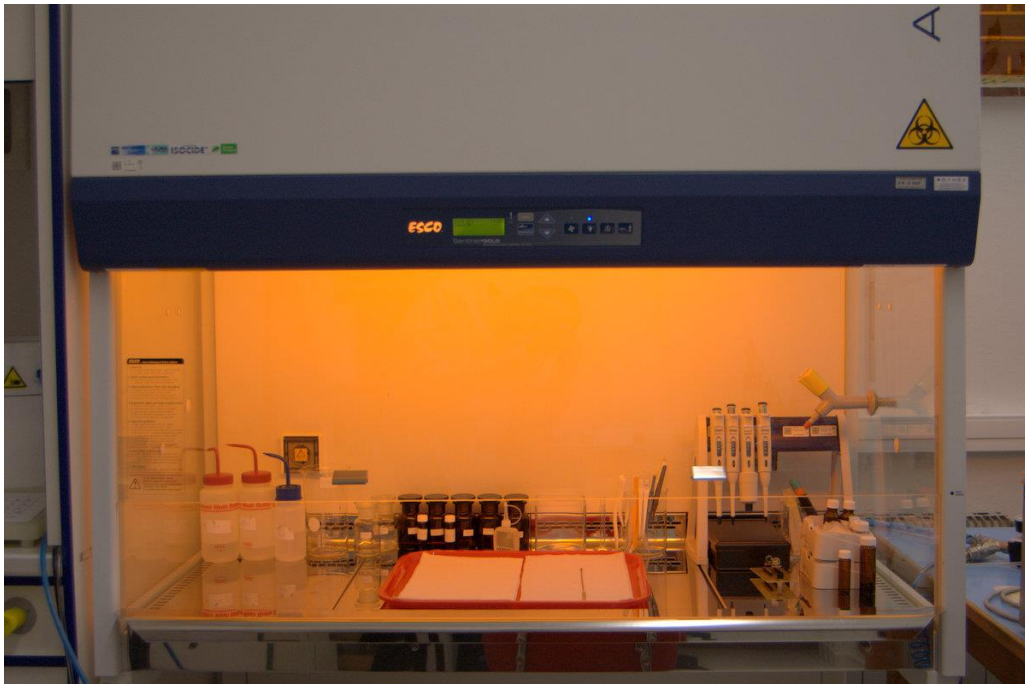
V této příloze jsou uvedeny fotografie vybavení laboratoře nanolitografie na katedře mikroelektroniky FEL ČVUT, kde se nachází tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831 a další přístroje, které byly použity pro vypracování této bakalářské práce.



Obrázek 1 Pracoviště materiálového deposičního systému s tiskárnou Fujifilm Dimatix DMP 2831, ovládacím PC a optickým mikroskopem Olympus BX60



Obrázek 2 Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831



Obrázek 3 Flow Box s odvětráním pro práci s čistými vzorky a chemikáliemi



Obrázek 4 Sušárna Memmert UN30



Obrázek 5 UV osvitová jednotka ProMa



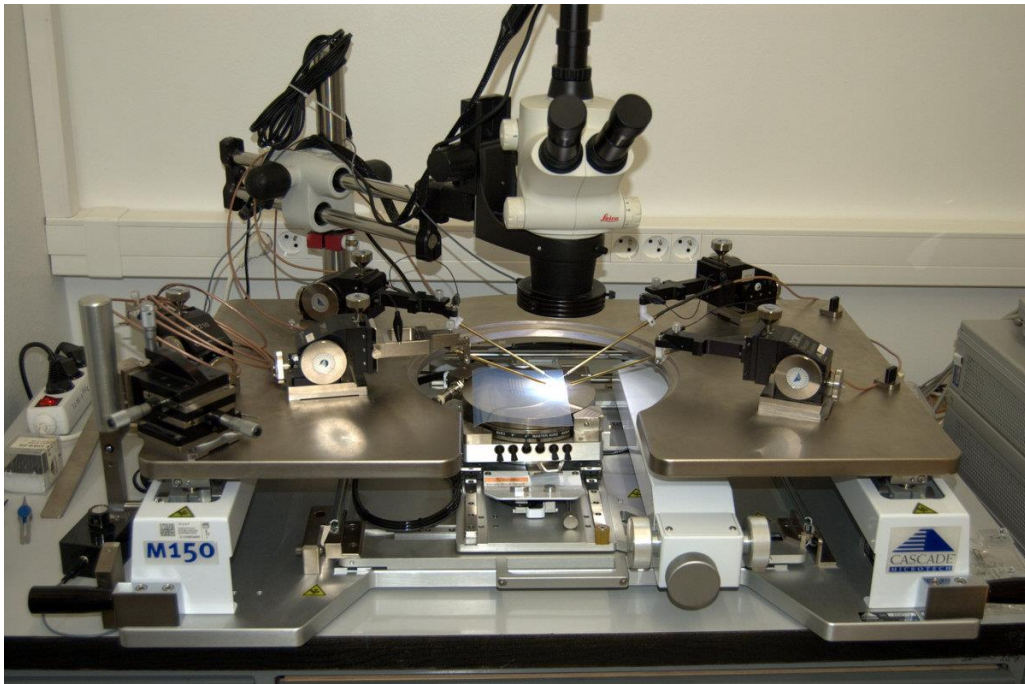
Obrázek 6 Ultrazvuková čistička JeKen PS-20A



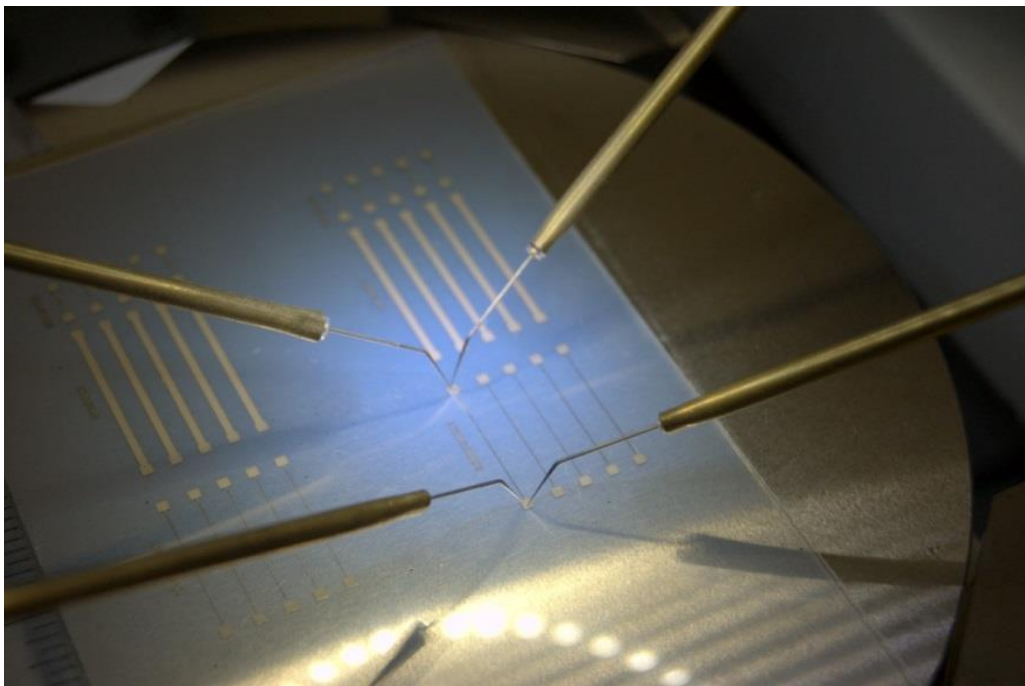
Obrázek 7 Laboratorní plotýnka P-LAB SD160



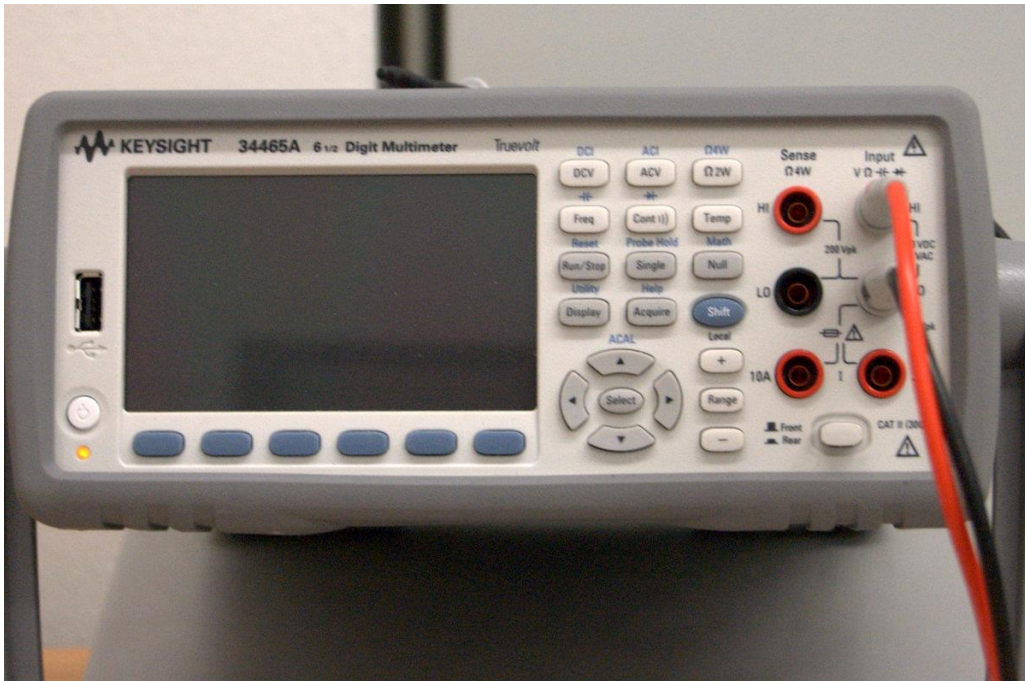
Obrázek 8 Měřicí zařízení Agilent 4156C



Obrázek 9 Hrotová stanice Cascade Microtech M150 pro elektrická měření



Obrázek 10 Detail hrotové stanice - měřící sondy



Obrázek 11 Digitální multimetr Keysight 34456A

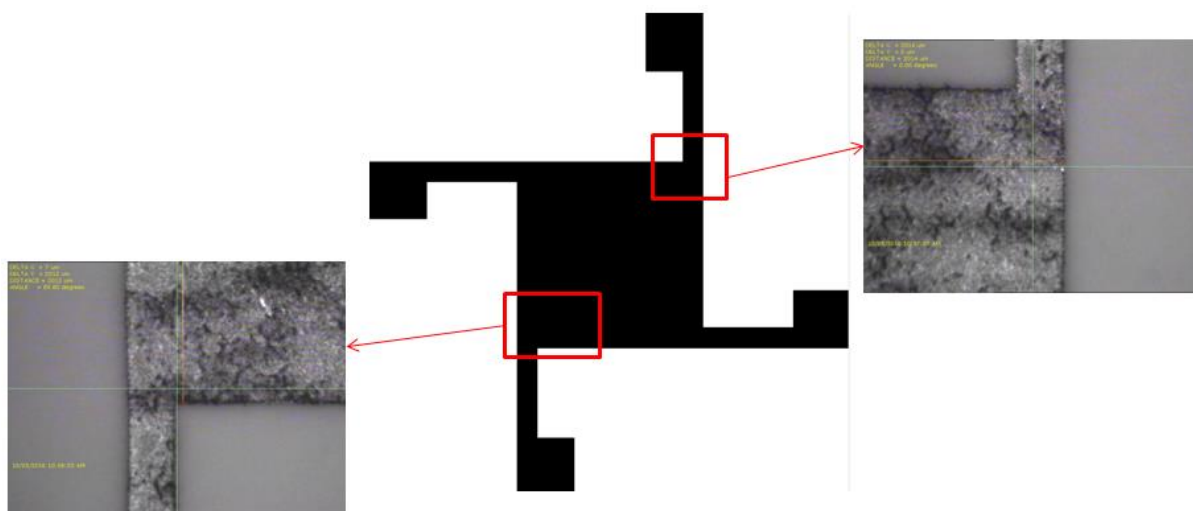


Obrázek 12 Měřicí RLC můstek Hameg LCR HM 8118

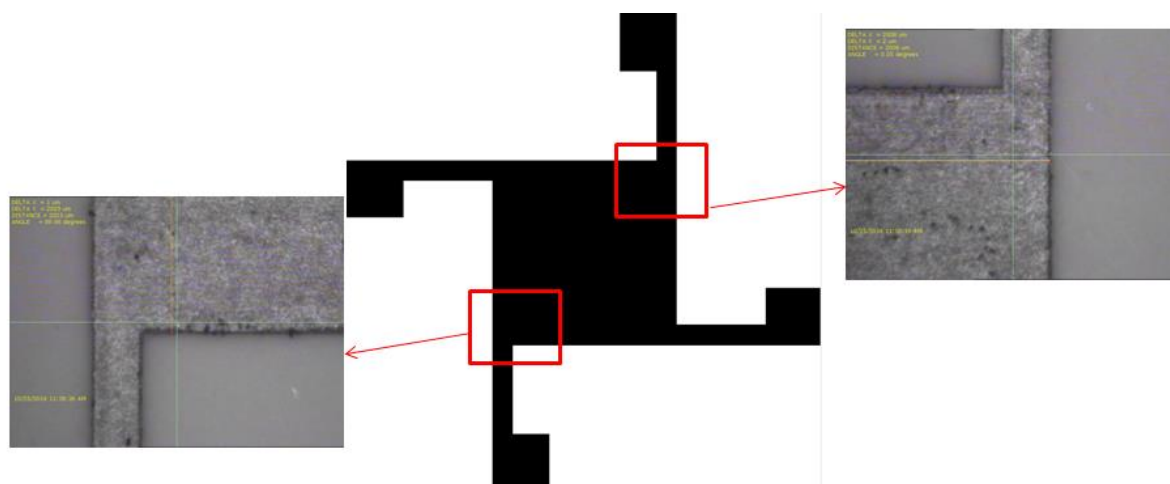
## Struktury tištěné až 5 vrstvami

Tato příloha obsahuje fotky motivů, které byly tištěny od jedné do pěti vrstev. U každé vrstvy bylo provedeno kontrolní měření rozměru na vybraném místě. Takto tištěné motivy byly Van der Pauw na fotopapír a PET folii a sada 3 vzorů lineárních odporů též na fotopapír a PET folii.

Struktura Van der Pauw (dále jen VDP) – fotopapír

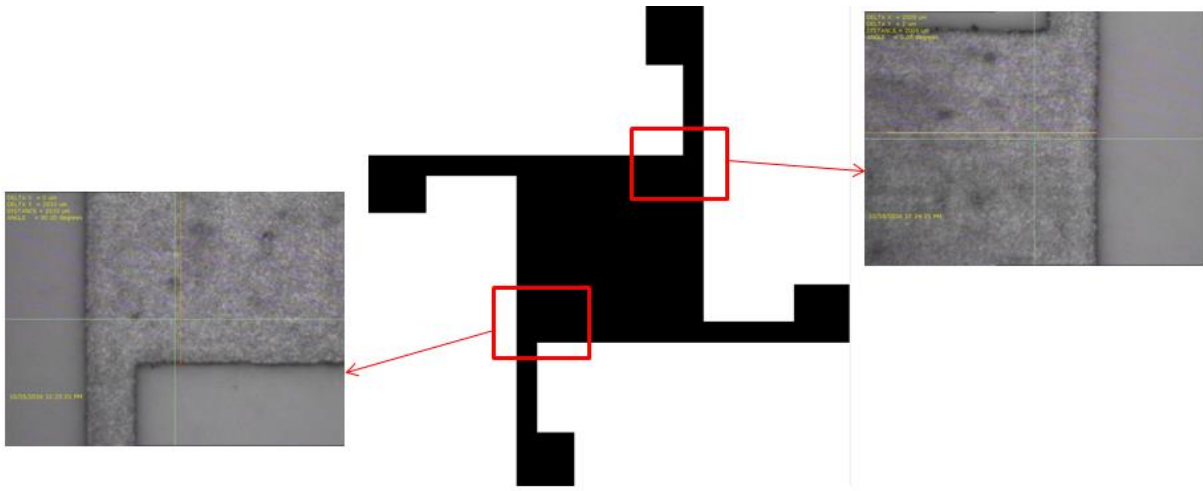


Obrázek 1 VDP, 1 vrstva

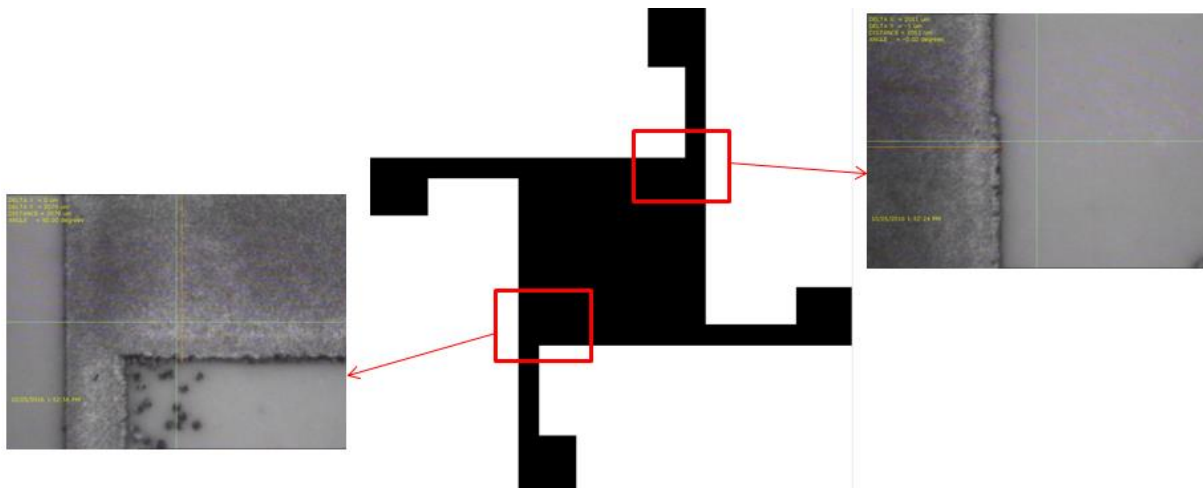


Obrázek 2 VDP, 2 vrstvy

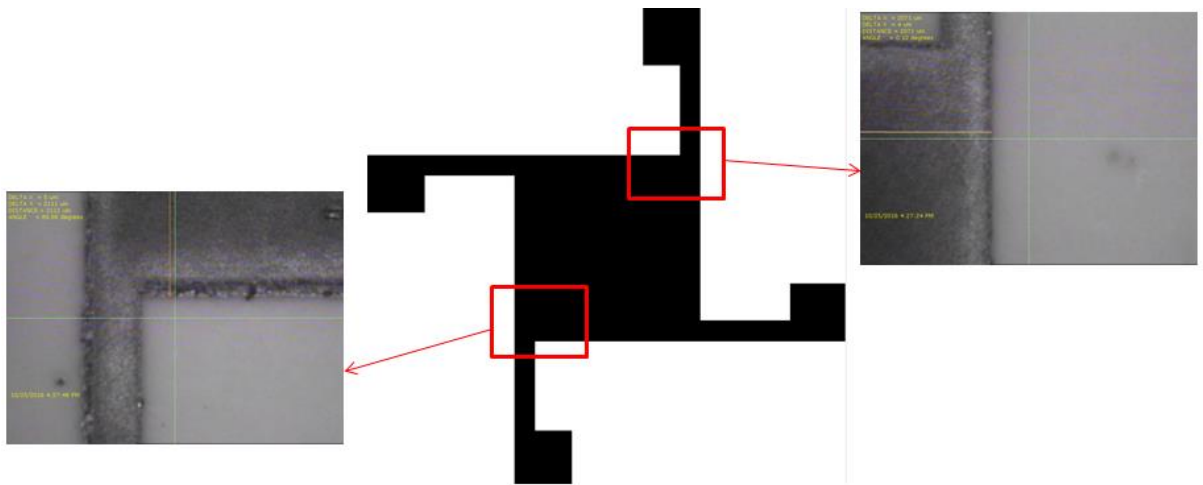




Obrázek 3 VDP, 3 vrstvy

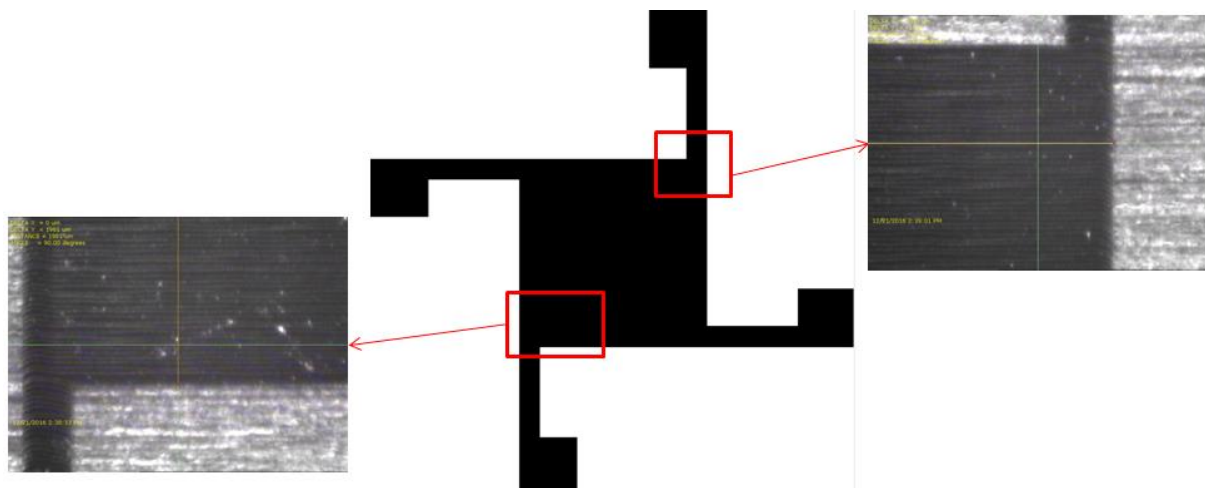


Obrázek 4 VDP, 4 vrstvy

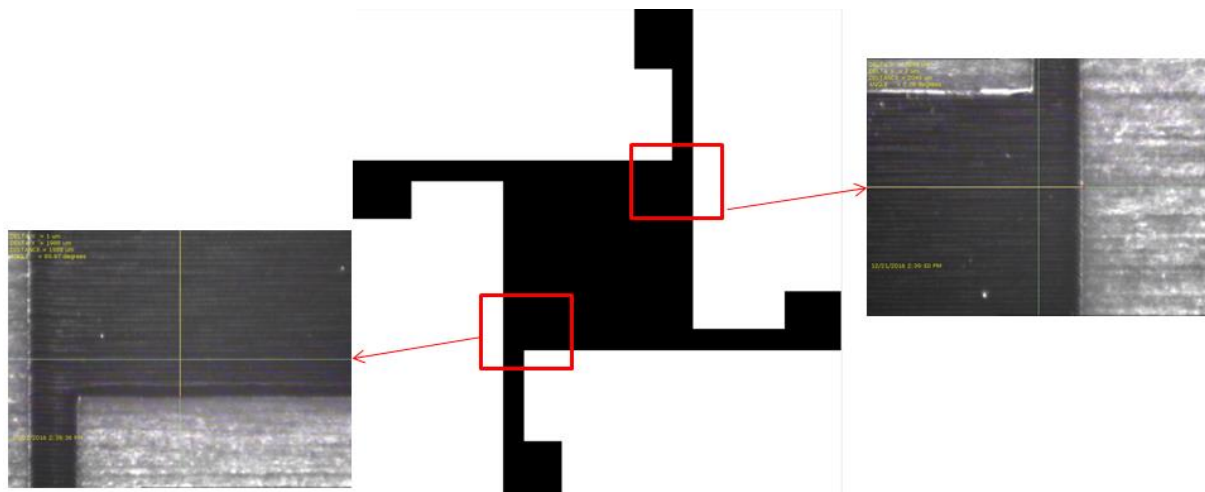


Obrázek 4 VDP, 5 vrstev

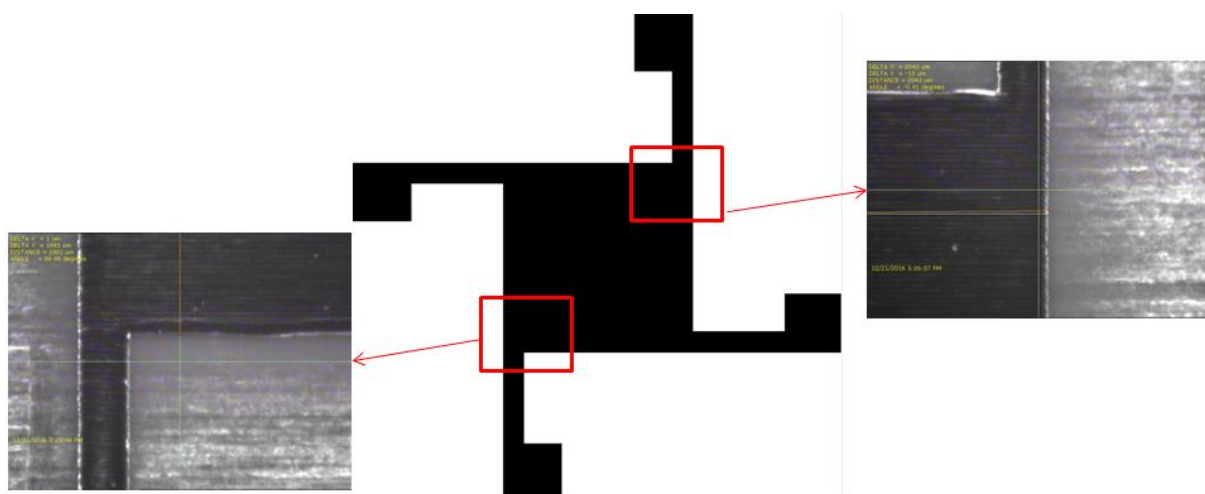
Van der Pauw – PET folie



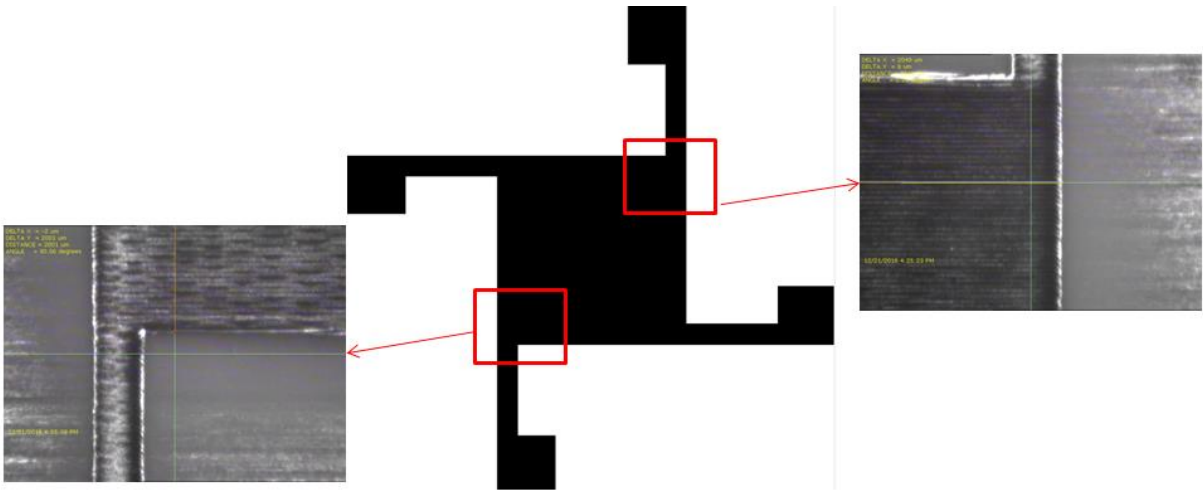
Obrázek 5 VDP, 1 vrstva



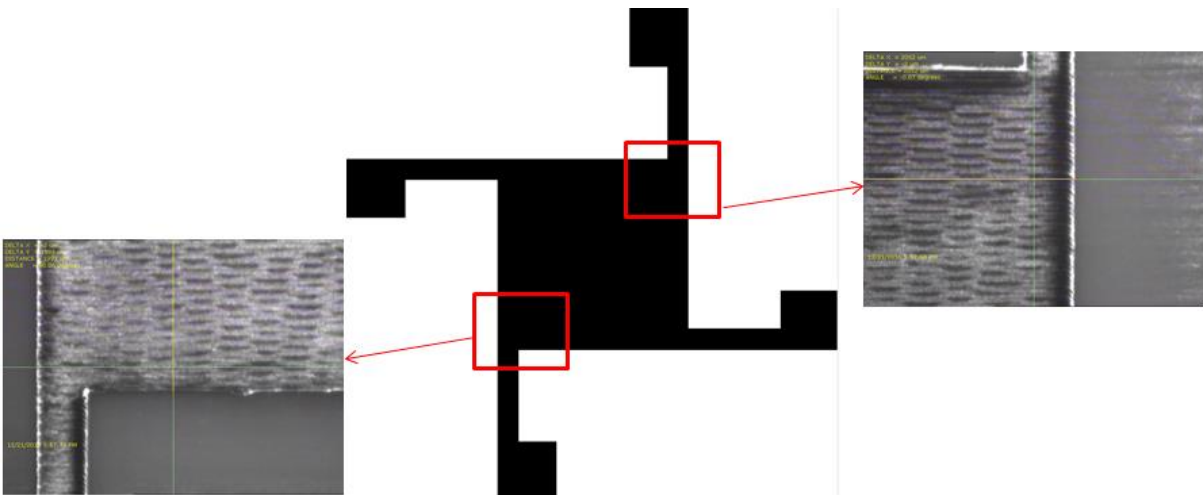
Obrázek 6 VDP, 2 vrstvy



Obrázek 7 VDP 3 vrstvy

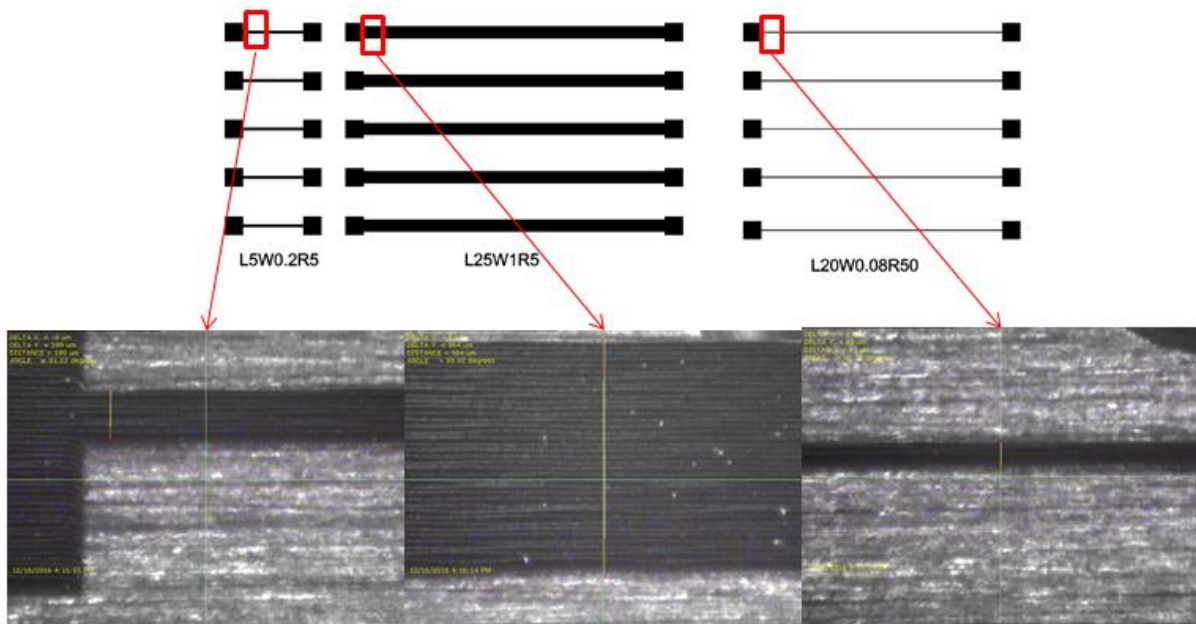


Obrázek 8 VDP, 5 vrstev

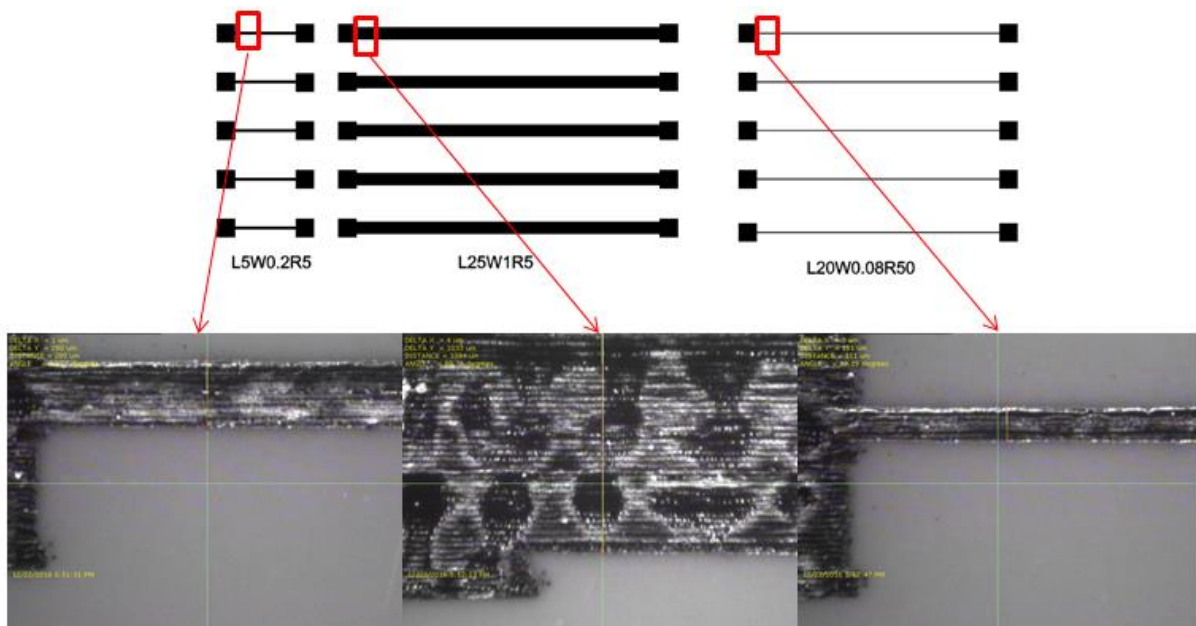


Obrázek 9 VDP, 5 vrstev

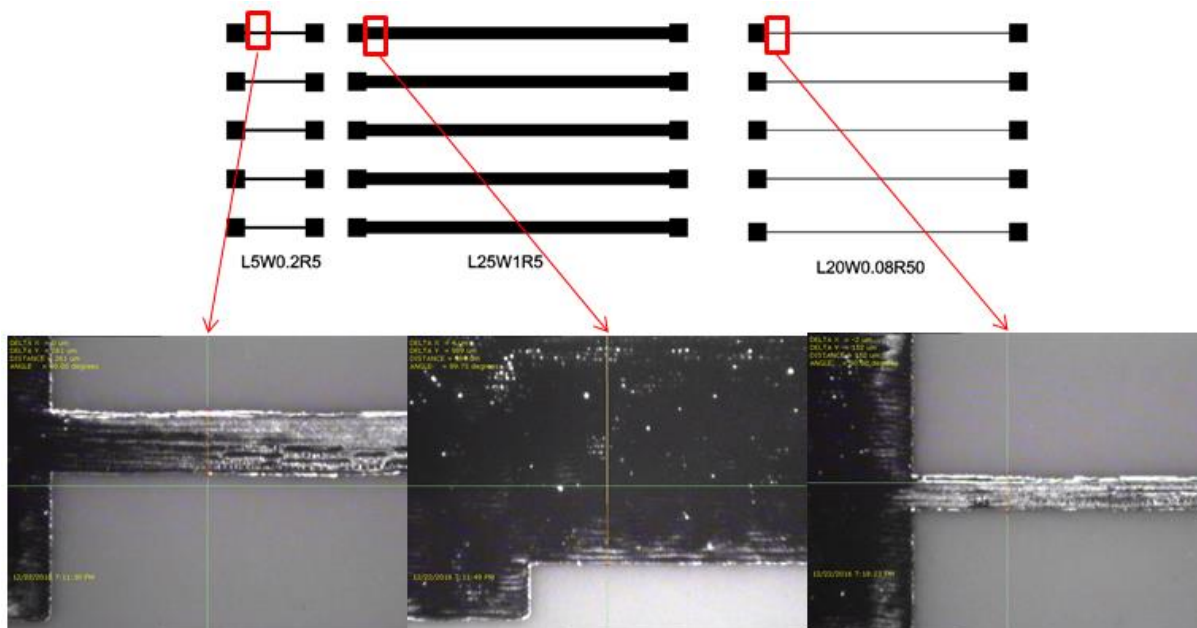
## Lineární odpory – PET folie



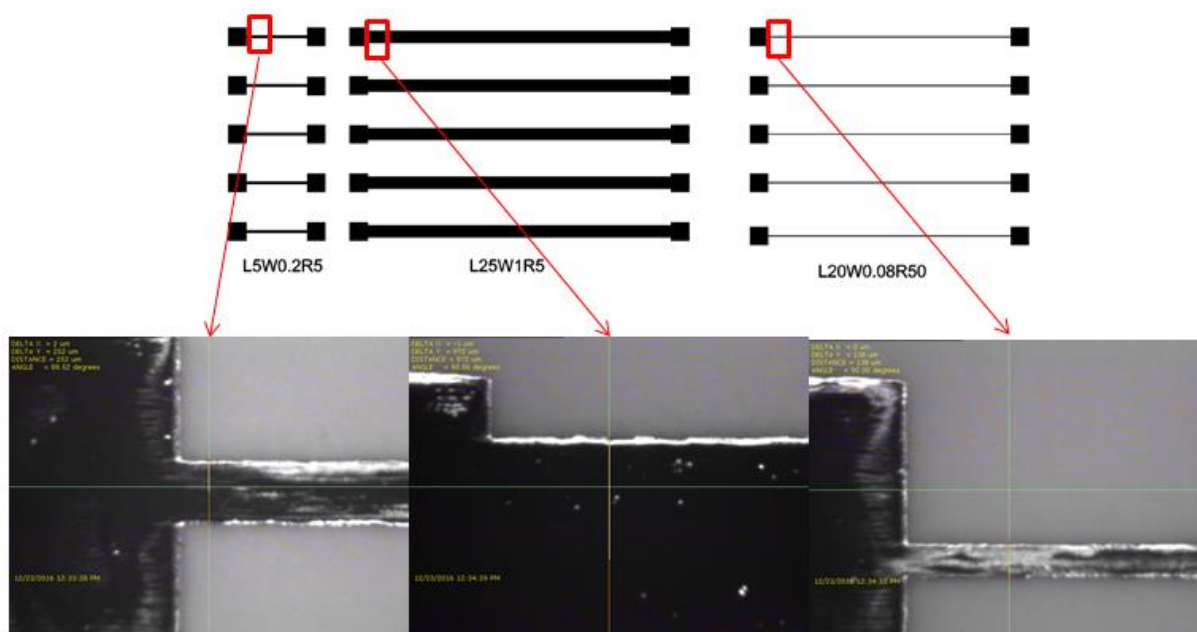
Obrázek 10 Lineární odpory, 1 vrstva



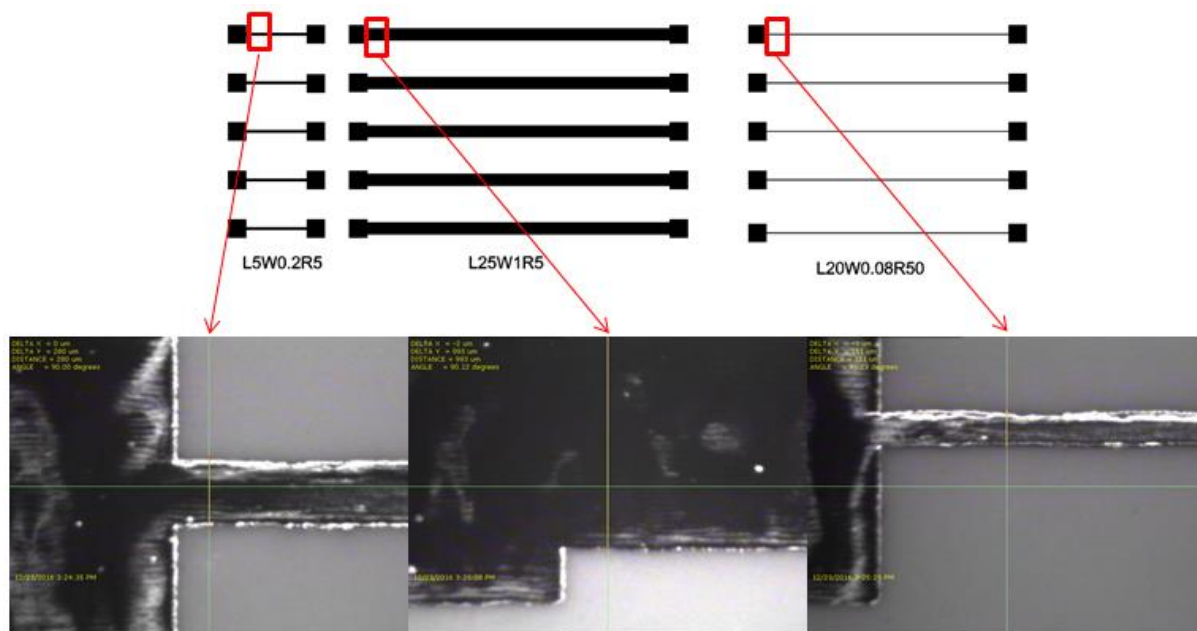
Obrázek 11 Lineární odpory, 2 vrstvy



Obrázek 12 Lineární odpory, 3 vrstvy



Obrázek 13 Lineární odpory, 4 vrstvy



Obrázek 14 Lineární odpory, 5 vrstev

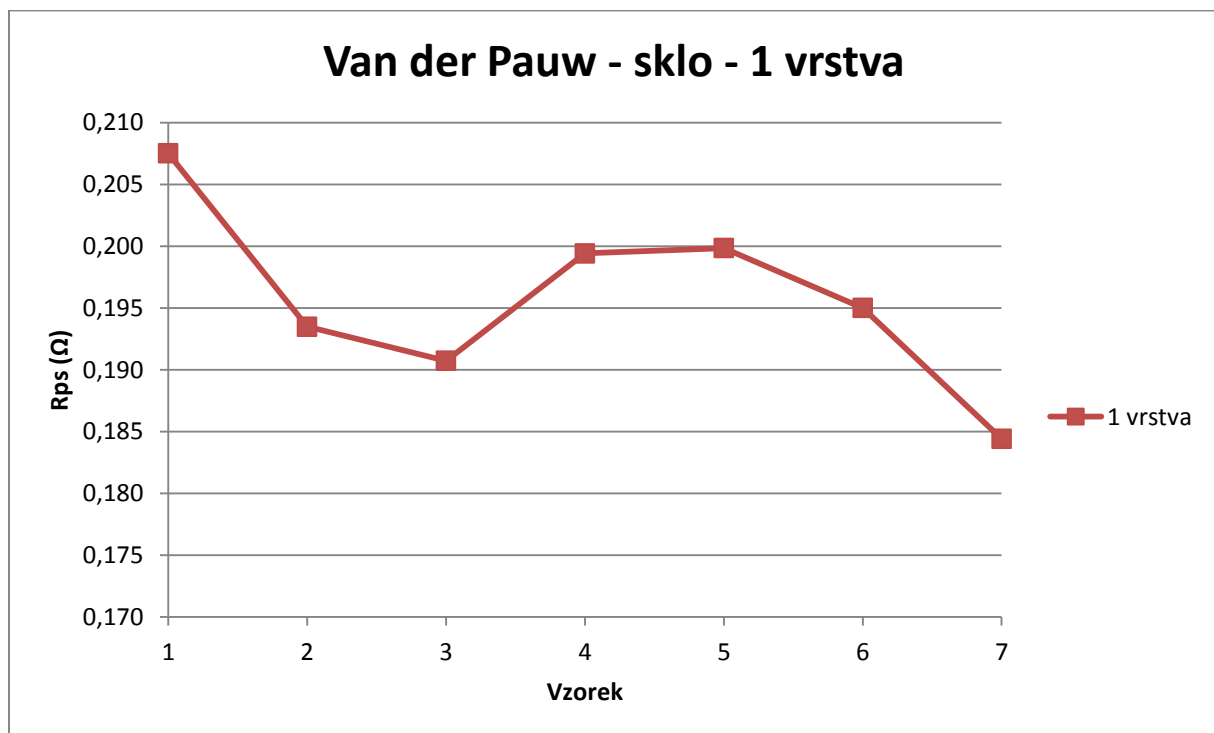
# Tabulky a grafy s naměřenými hodnotami

V této příloze jsou tabulky a grafy k měřeným vzorkům. S těchto hodnot se vypočítávaly průměrné hodnoty a odvíjel se od nich další postup práce.

Van der Pauw – 1 vrstva - sklo

Van der Pauw - sklo - 1 vrstva								
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
1 vrstva	0,208	0,193	0,191	0,199	0,200	0,195	0,184	0,195

Tabulka 1 Motiv Van der Pauw natištěný 1 vrstvou na skle

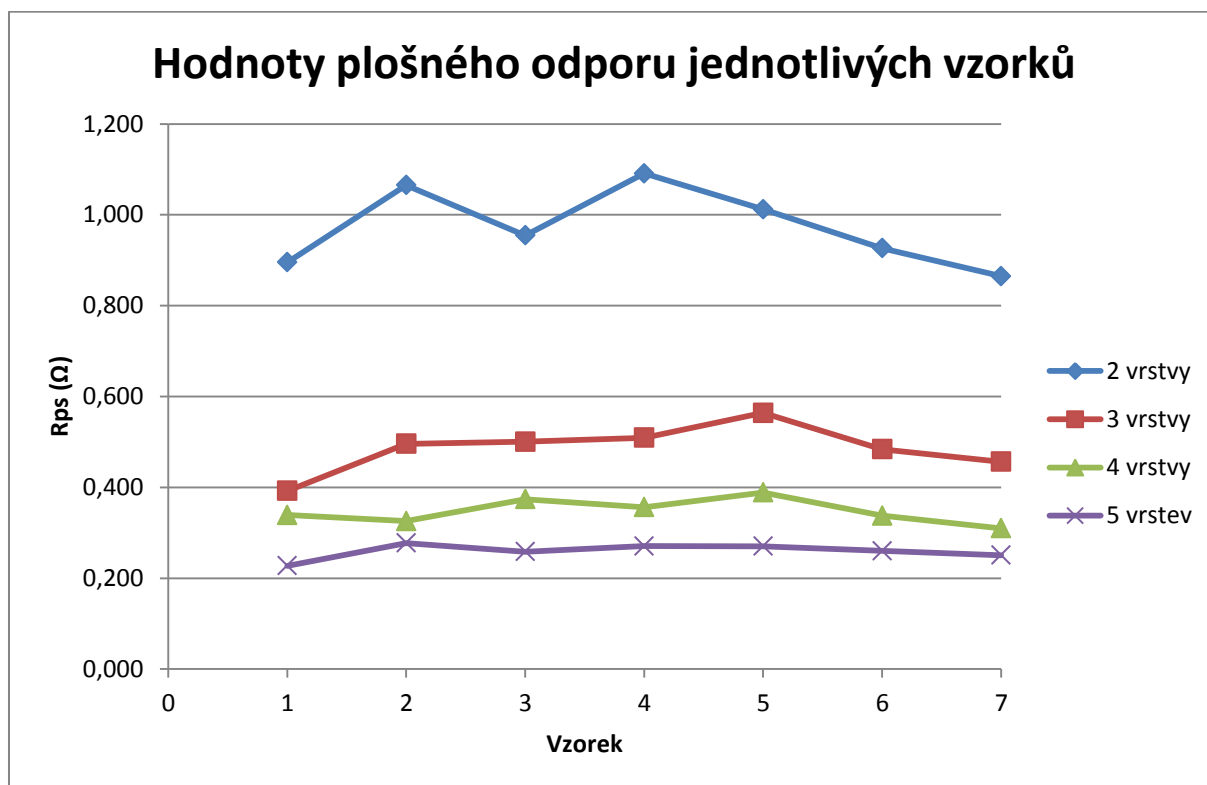


Obrázek 1 Van der Pauw - sklo 1 vrstva

Van der Pauw – 2-5 vrstev Fotopapír

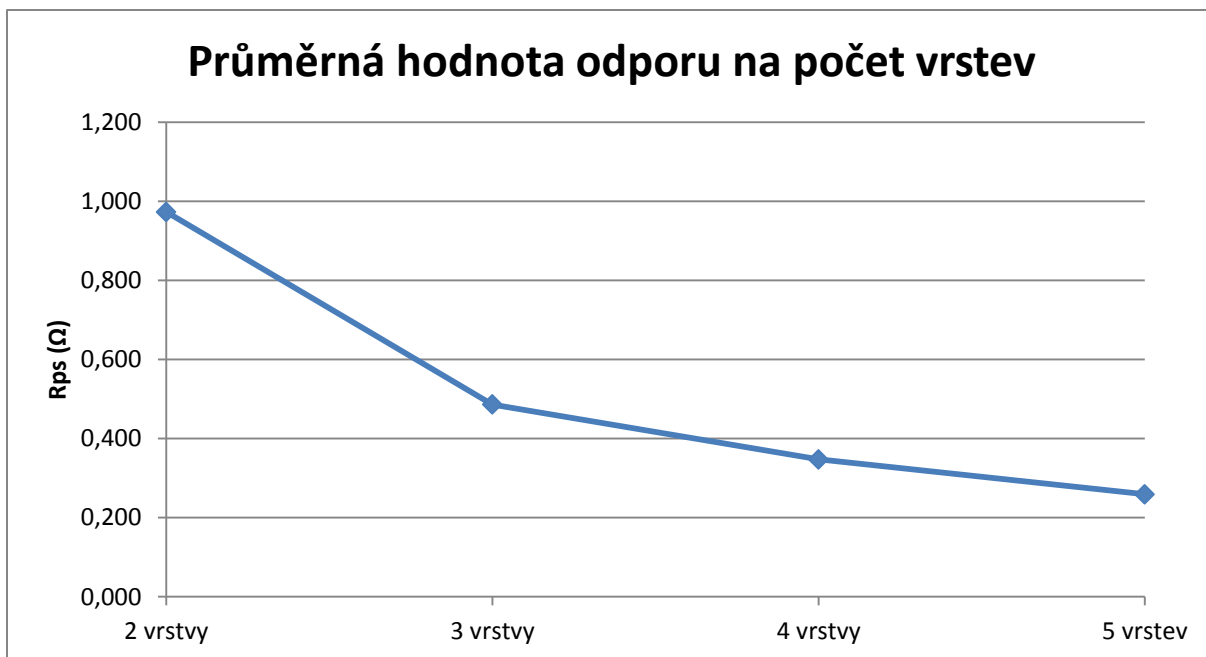
Vzorek	1	2	3	4	5	6	7	Průměr
2 vrstvy	0,895	1,065	0,955	1,091	1,012	0,926	0,865	0,973
3 vrstvy	0,392	0,496	0,500	0,509	0,564	0,484	0,456	0,486
4 vrstvy	0,339	0,326	0,374	0,356	0,389	0,338	0,310	0,347
5 vrstev	0,227	0,277	0,258	0,271	0,270	0,260	0,251	0,259

Tabulka 2 Motiv Van der Pauw natištěný na fotopapír, 2 – 5 vrstev



Obrázek 2 Hodnoty plošného odporu jednotlivých vzorků



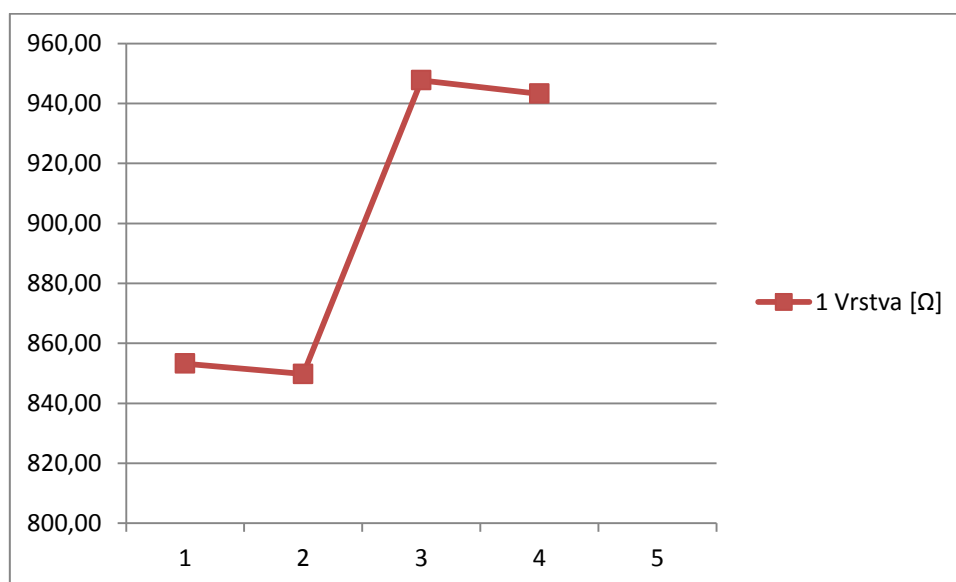


Obrázek 3 Průměrná hodnota odporu na počet vrstev

Lineární a meandrové odpory - PET

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	853,19	849,75	947,69	943,20	-

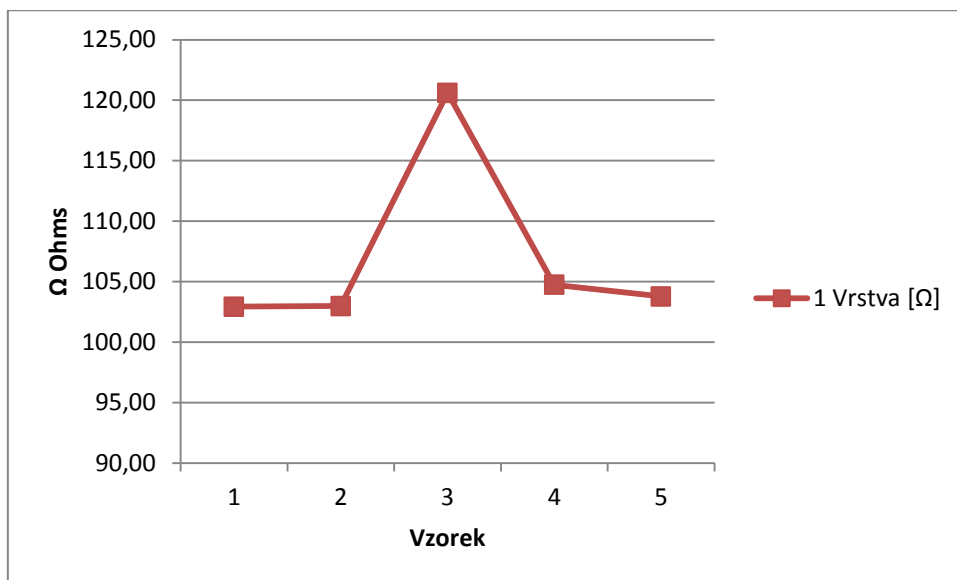
Tabulka 3 Lineární odpor sada III, ( $\Omega$ )



Obr. 4 Lineární odpor sada III, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	102,92	102,98	120,62	104,74	103,77

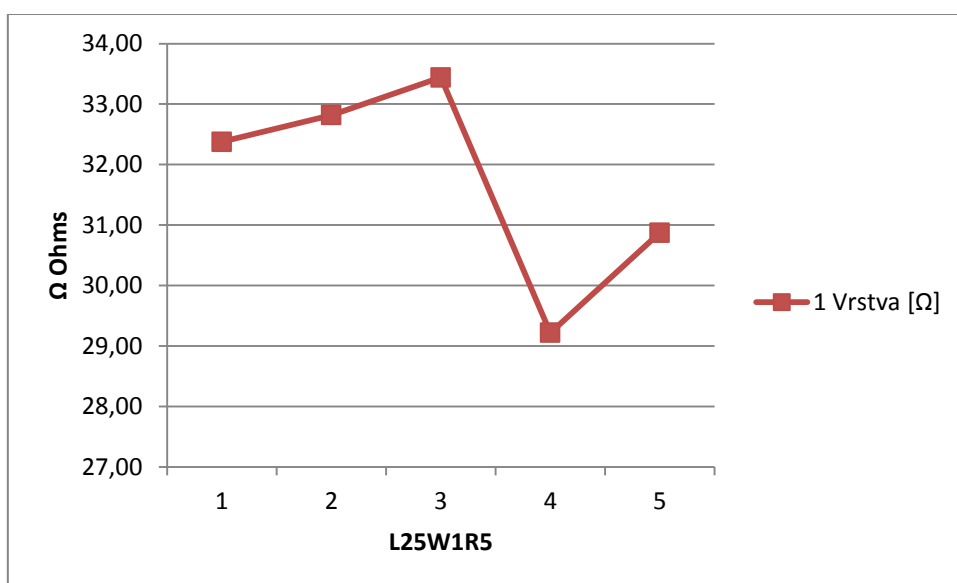
Tabulka 4 Meandrové odpory sada IV, ( $\Omega$ )



Obrázek 5 Meandrové odpory sada IV, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	32,38	32,82	33,44	29,22	30,87

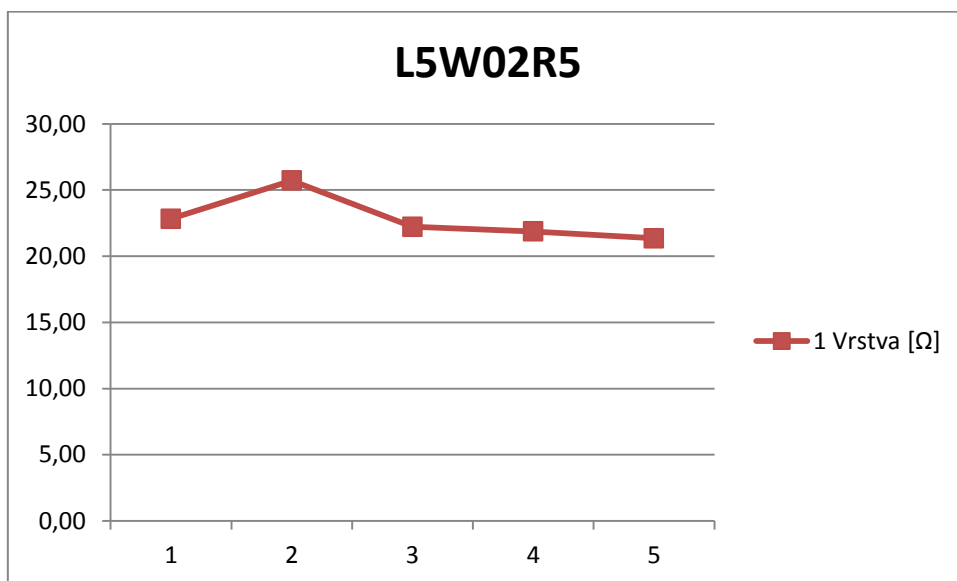
Tabulka 5 Lineární odpory sada II, ( $\Omega$ )



Obrázek 6 Lineární odpory sada II, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	22,83	25,71	22,22	21,87	21,35

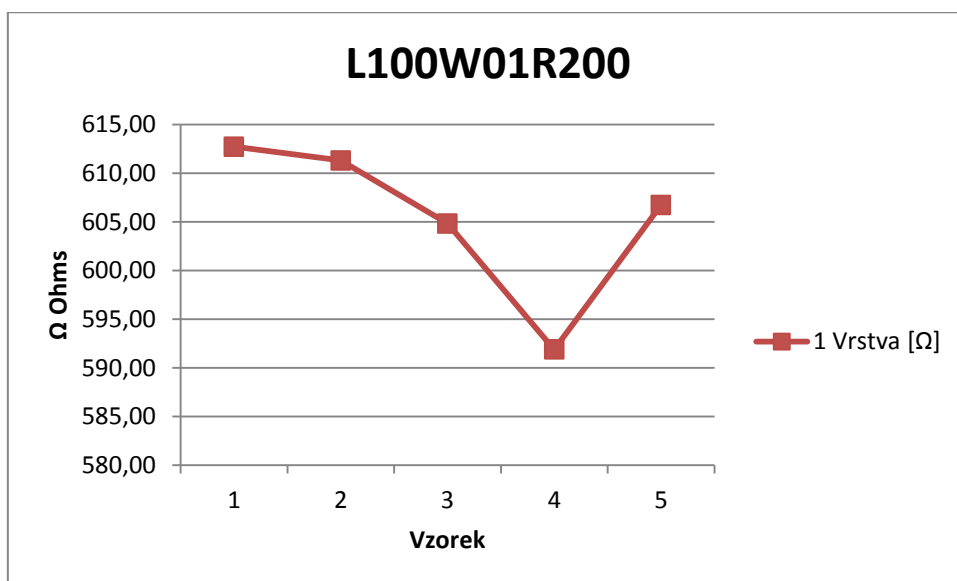
Tabulka 6 Lineární odpory sada I, ( $\Omega$ )



Obrázek 7 Lineární odpory sada I, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	612,71	611,29	604,81	591,87	606,72

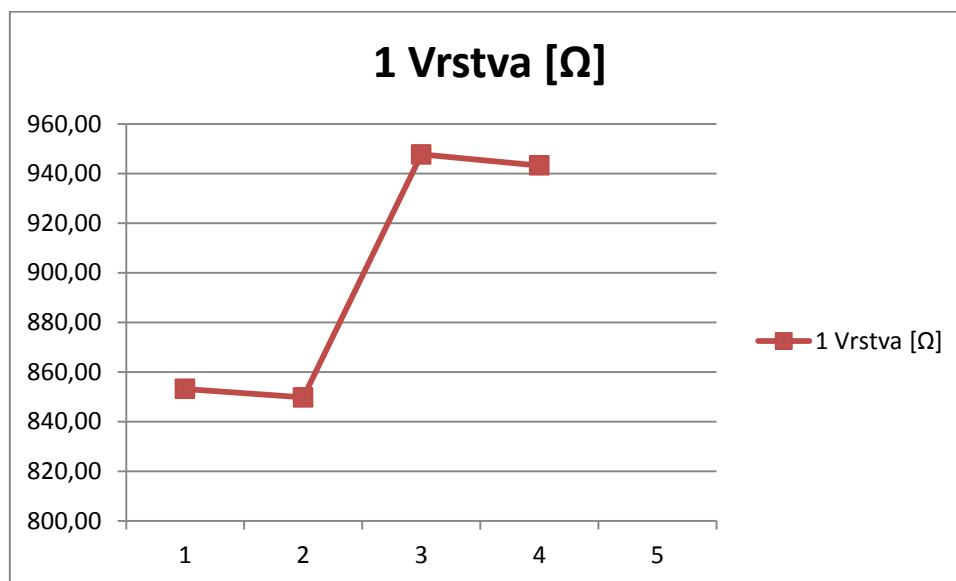
Tabulka 7 Meandrové odpory sada V, ( $\Omega$ )



Obrázek 8 Meandrové odpory sada V, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	853,19	849,75	947,69	943,20	-

Tabulka 8 Meandrové odpory Sada VI, ( $\Omega$ )

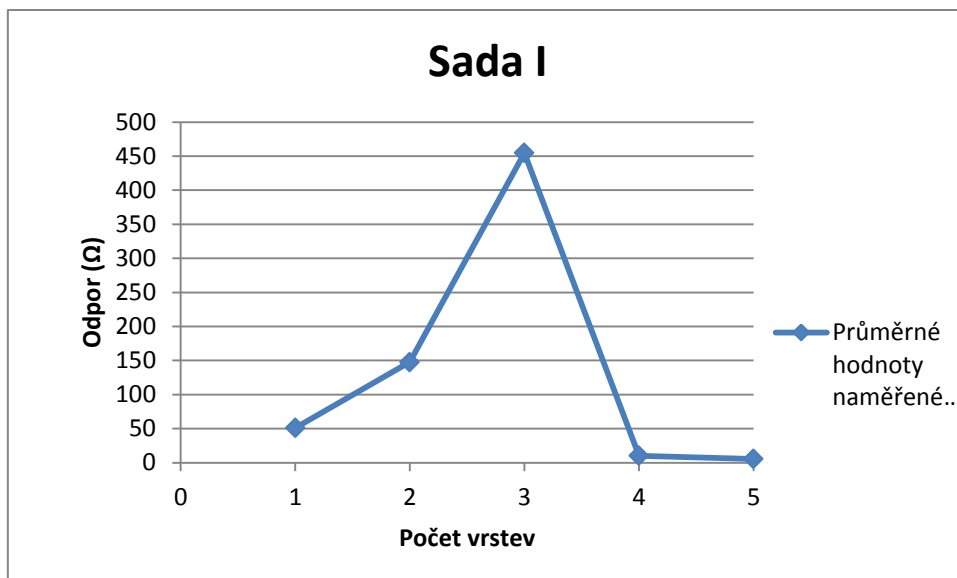


Obrázek 9 Meandrové odpory Sada VI, ( $\Omega$ )

Lineární odpory, fotonapír 1 – 5 vrstev

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	40,56	35,04	60,26	78,43	41,22	51,10
2 Vrstva [ $\Omega$ ]	29,36	135,85	159,01	236,73	177,53	147,70
3 Vrstva [ $\Omega$ ]	79,71	882,23	254,45	1033,27	24,31	454,79
4 Vrstva [ $\Omega$ ]	11,07	9,56	10,01	9,45	10,61	10,14
5 Vrstvy [ $\Omega$ ]	3,40	7,31	7,31	5,35	3,91	5,46

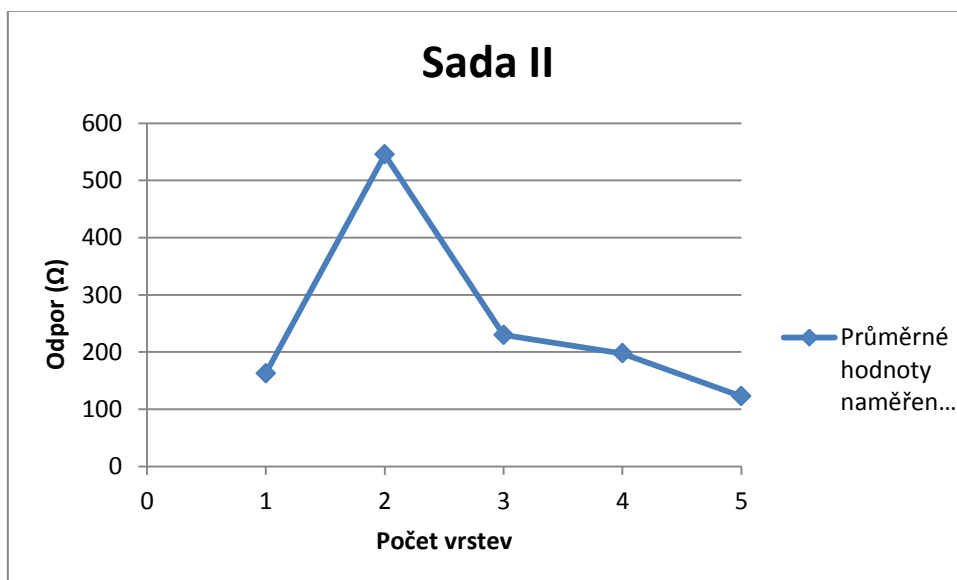
Tabulka 9 lineární odpory Sada I, ( $\Omega$ )



Obrázek 10 Lineární odpory sada I ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	161,38	198,84	131,25	177,48	143,95	162,58
2 Vrstva [ $\Omega$ ]	247,22	297,61	1134,11	193,02	853,98	545,19
3 Vrstva [ $\Omega$ ]	179,36	200,12	212,42	329,99	226,57	229,69
4 Vrstva [ $\Omega$ ]	142,20	282,58	118,07	150,22	295,58	197,73
5 Vrstva [ $\Omega$ ]	37,73	134,23	195,55	56,17	190,00	122,74

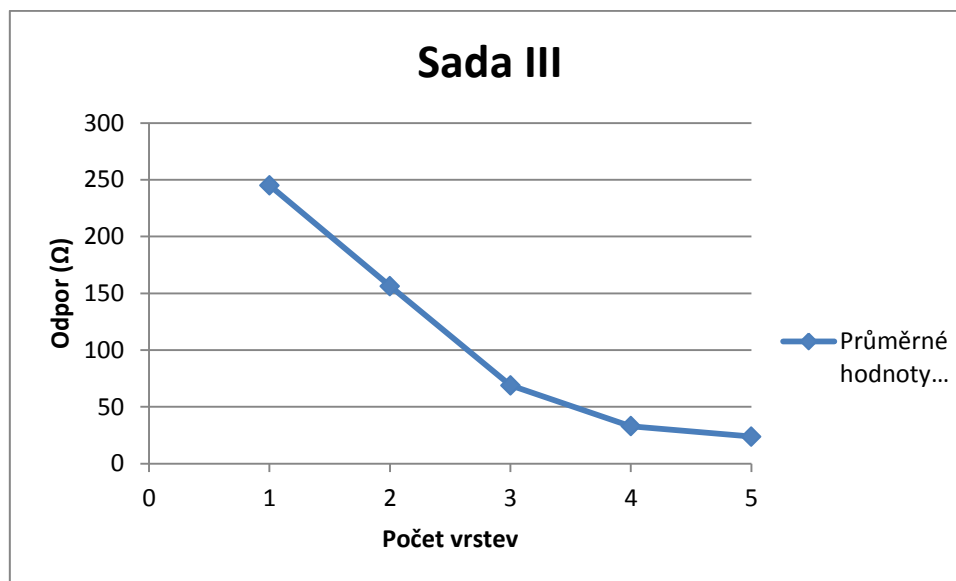
Tabulka 10 Lineární odpory sada II, ( $\Omega$ )



Obrázek 11 Lineární odpory sada II, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5	Prumer
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	223,37	241,01	291,37	235,11	234,60	245,09
2 Vrstvy [ $\Omega$ ]	123,10	199,50	231,22	118,97	108,95	156,35
3 Vrstvy [ $\Omega$ ]	55,56	48,92	102,21			68,89
4 Vrstvy [ $\Omega$ ]	29,86	31,56	43,57	29,80	30,02	32,96
5 Vrstvy [ $\Omega$ ]	20,43	21,85	29,96	23,67	23,00	23,78

Tabulka 11 Lineární odpory sada III, ( $\Omega$ )

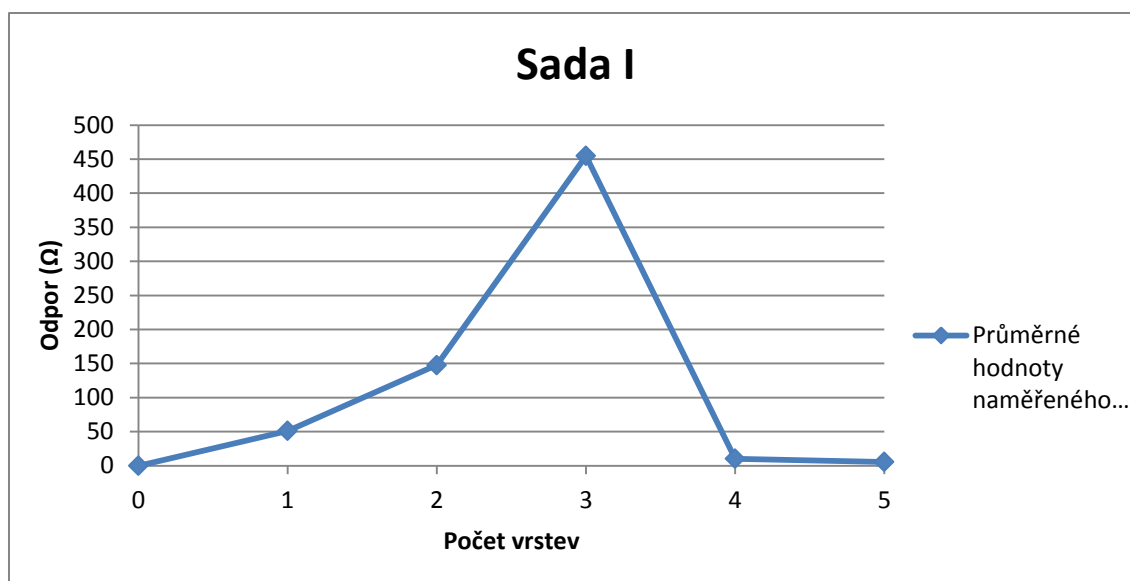


Obrázek 12 Lineární odpory sada III, ( $\Omega$ )

Lineární odpory, PET, 1 – 5 vrstev

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	40,56	35,04	60,26	78,43	41,22	51,10
2 Vrstva [ $\Omega$ ]	29,36	135,85	159,01	236,73	177,53	147,70
3 Vrstva [ $\Omega$ ]	79,71	882,23	254,45	1033,27	24,31	454,79
4 Vrstva [ $\Omega$ ]	11,07	9,56	10,01	9,45	10,61	10,14
5 Vrstvy [ $\Omega$ ]	3,40	7,31	7,31	5,35	3,91	5,46

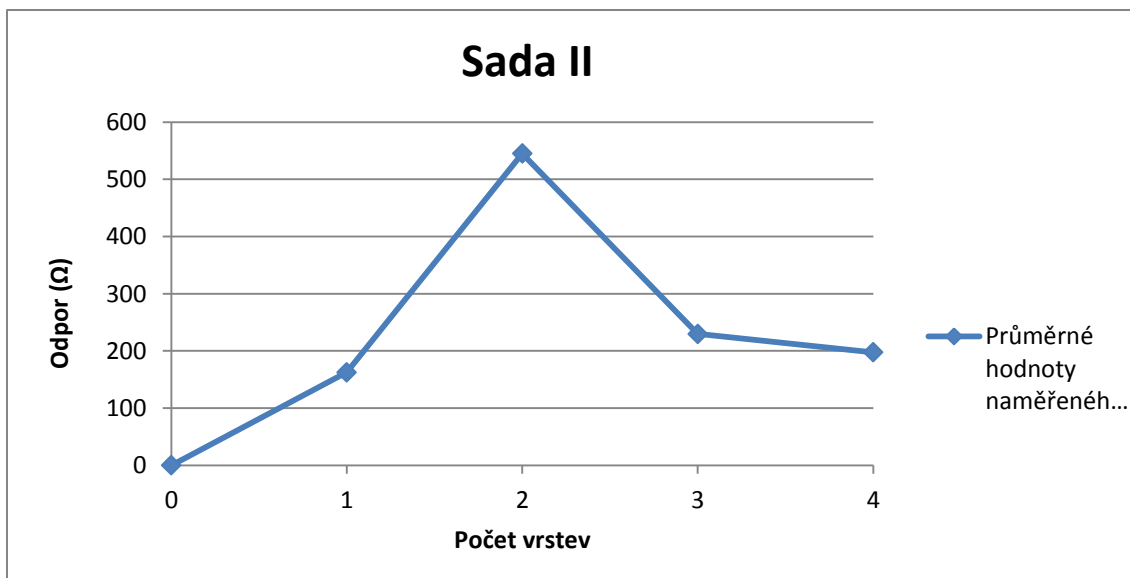
Tabulka 13 Lineární odpory, sada I, ( $\Omega$ )



Obrázek 14 Lineární odpory, sada I, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	161,38	198,84	131,25	177,48	143,95	162,58
2 Vrstva [ $\Omega$ ]	247,22	297,61	1134,11	193,02	853,98	545,19
3 Vrstva [ $\Omega$ ]	179,36	200,12	212,42	329,99	226,57	229,69
4 Vrstva [ $\Omega$ ]	142,20	282,58	118,07	150,22	295,58	197,73
5 Vrstva [ $\Omega$ ]	37,73	134,23	195,55	56,17	190,00	122,74

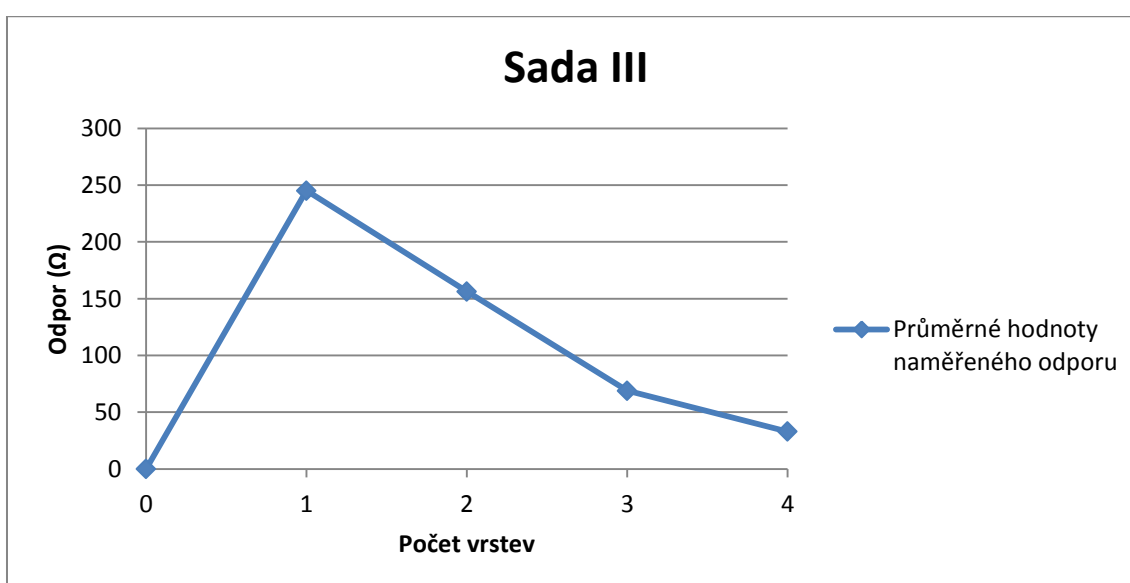
Tabulka 13 Lineární odpory sada II, ( $\Omega$ )



Obrázek 15 Lineární odpory, sada II, ( $\Omega$ )

Vzorek	1	2	3	4	5	Průměr
1 Vrstva [ $\Omega$ ]	223,37	241,01	291,37	235,11	234,60	245,09
2 Vrstvy [ $\Omega$ ]	123,10	199,50	231,22	118,97	108,95	156,35
3 Vrstvy [ $\Omega$ ]	55,56	48,92	102,21			68,89
4 Vrstvy [ $\Omega$ ]	29,86	31,56	43,57	29,80	30,02	32,96
5 Vrstvy [ $\Omega$ ]	20,43	21,85	29,96	23,67	23,00	23,78

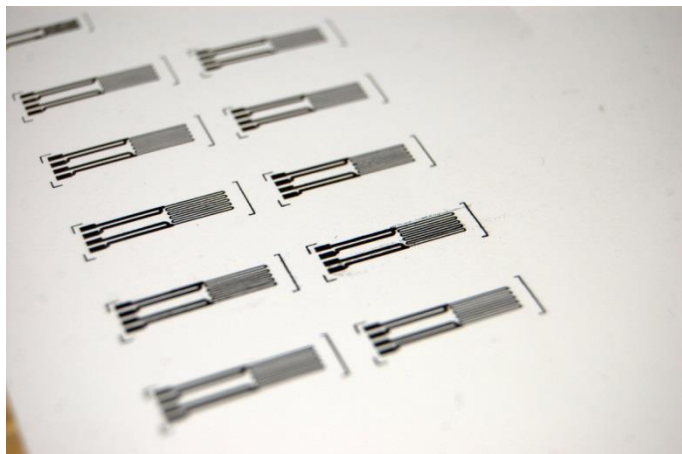
Tabulka 14 Lineární odpory sada III, ( $\Omega$ )



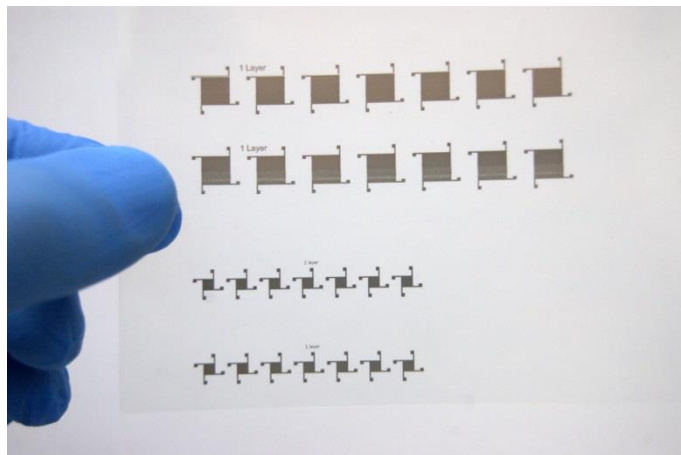
Obrázek 16 Lineární odpory, sada III, ( $\Omega$ )



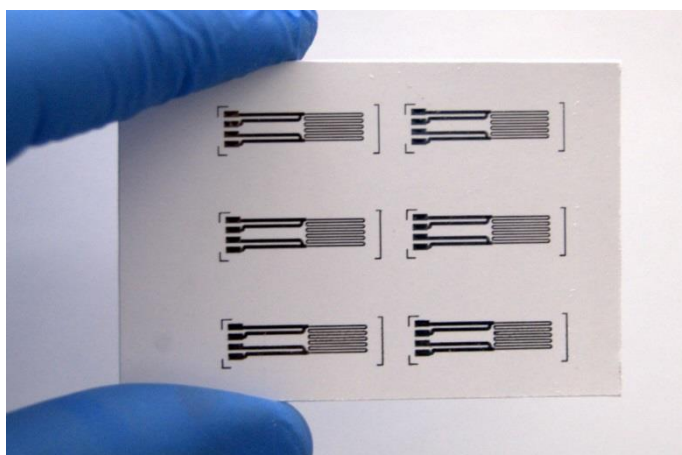
## Ukázky realizovaných struktur



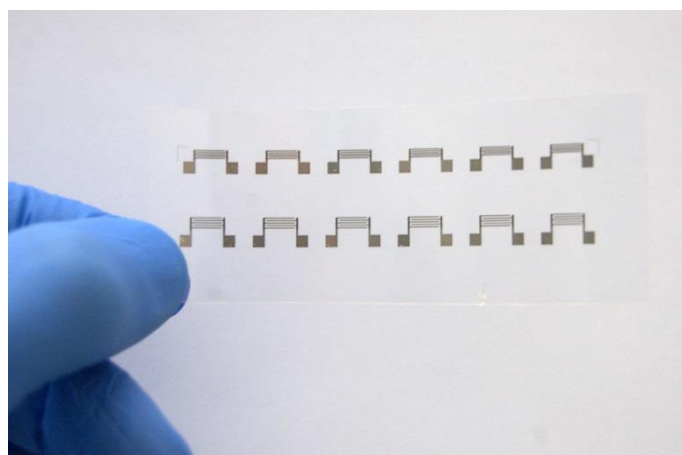
Obrázek 1: Tenzometr, fotopapír



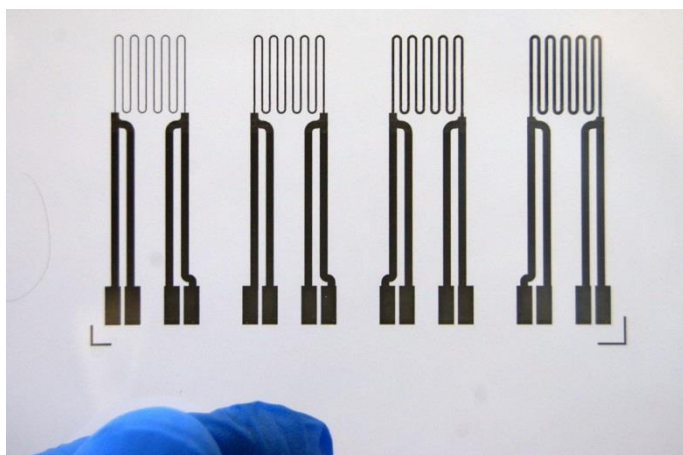
Obrázek 2: Van der Pauw, PET



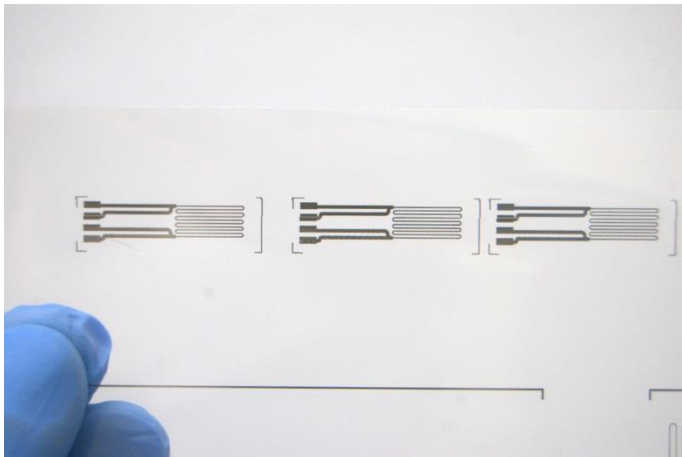
Obrázek 3 Tenzometr, fotopapír



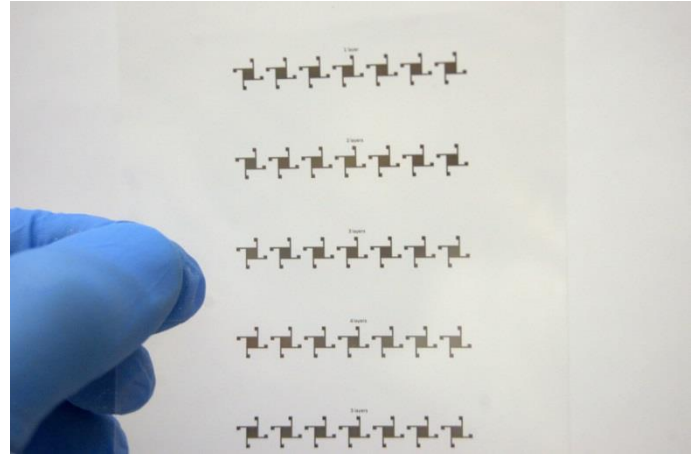
Obrázek 4 Interdigitální kapacitor, PET



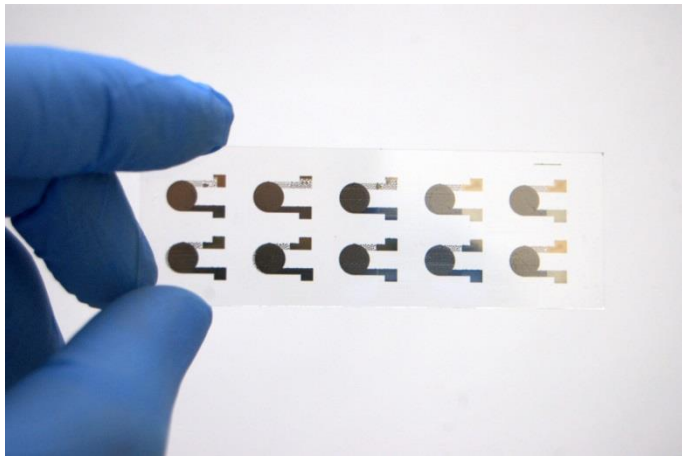
Obrázek 5 Tenzometr, PET



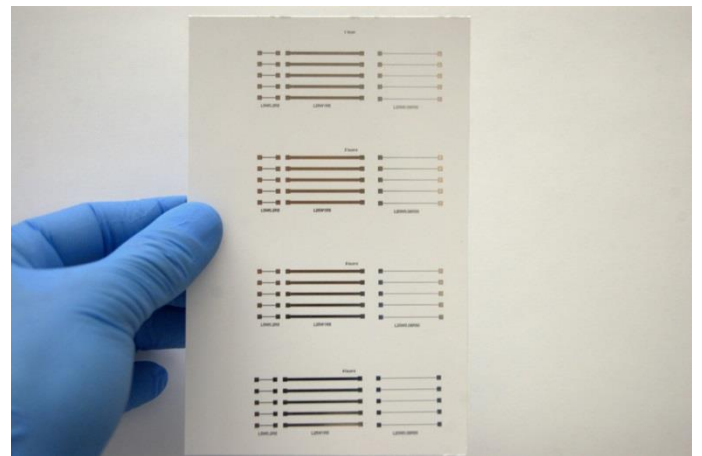
Obrázek 6 Tenzometr PET



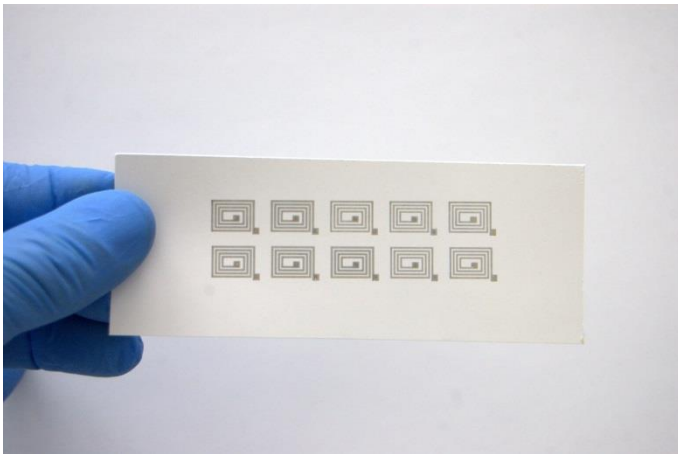
Obrázek 7 Van der Pauw PET



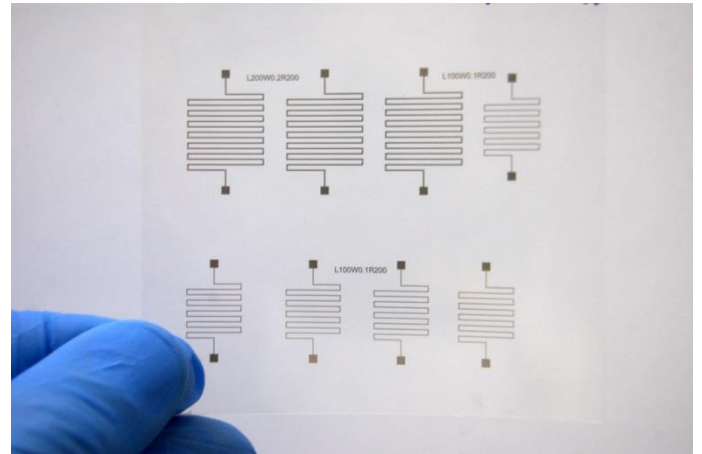
Obrázek 8 Deskový kapacitor



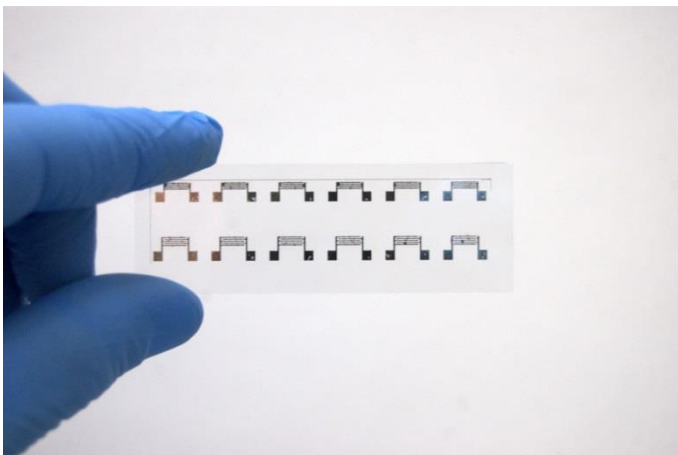
Obrázek 9 Lineární odpory, fotopapír, 1 – 5 vrstev



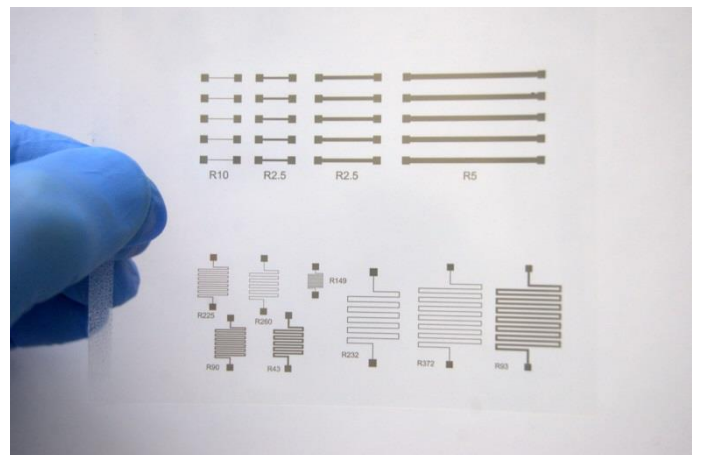
Obrázek 10 Induktory, fotopapír



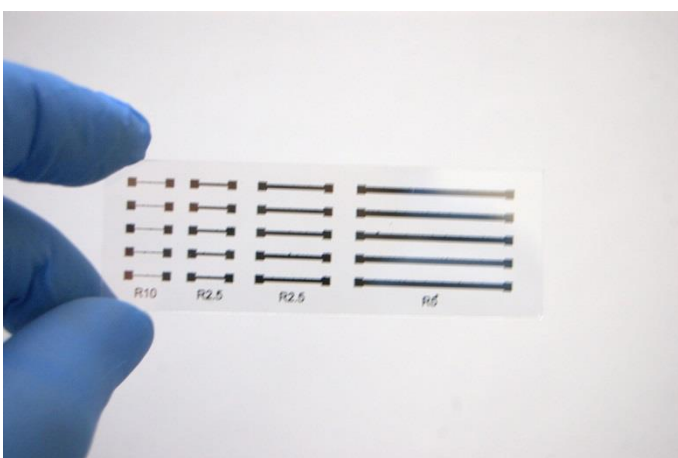
Obrázek 11 Meandrové odpory, PET



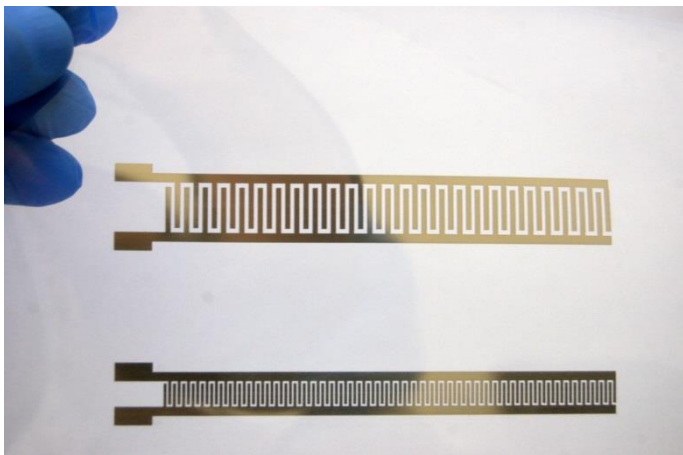
Obrázek 12 Kapacity, sklo



Obrázek 13 Lineární a meandrové odpory, PET



Obrázek 14 Lineární odpory, sklo



Obrázek 15 Senzor výšky hladiny