

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Bc. Vojtěch Povolný



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Tištěné tenkovrstvé kapacitory na flexibilních substrátech

Inkjet printed thin film capacitors on flexible substrates

Diplomová práce

Studijní program: Elektronika a komunikace
Studijní obor: Komunikační systémy a sítě
Vedoucí práce: Ing. Alexandr Laposá

Bc. Vojtěch POVOLNÝ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Povolný** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **406140**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Studijní obor: **Komunikační systémy a sítě**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Tištěné tenkovrstvé kapacitory na flexibilních substrátech

Název diplomové práce anglicky:

Inkjet Printed Thin Film Capacitors on Flexible Substrates

Pokyny pro vypracování:

1. Popište aktuální stav vývoje v oblasti tištěných kapacitorů pro flexibilní elektroniku.
2. Zpracujte rešerši dielektrických materiálů vhodných pro výrobu kapacitorů (zaměřte se zejména na materiály kompatibilní s nízkoteplotními tiskovými metodami).
3. S využitím znalostí získaných v části 1 a 2 navrhnete postup výroby tenkovrstvých kapacitorů tištěných technologií ink-jet a použijte jej pro jejich realizaci.
4. Experimentálně připravené kapacitory charakterizujte, analyzujte dosažené výsledky a optimalizujte proces přípravy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. G. Korvink, P. J. Smith, and D. Y. Shin, Inkjet-based micromanufacturing. 2012, ISBN 9783527319046.
- [2] N. Graddage, T. Y. Chu, H. Ding, C. Py, A. Davdand, and Y. Tao, "Inkjet printed thin and uniform dielectrics for capacitors and organic thin film transistors enabled by the coffee ring effect," Org. Electron. physics, Mater. Appl., 2016.
- [3] B. K. Tehrani, C. Mariotti, B. S. Cook, L. Roselli, and M. M. Tentzeris, "Development, characterization, and processing of thin and thick inkjet-printed dielectric films," Org. Electron. physics, Mater. Appl., 2016.
- [4] C. L. Cho, H. ling Kao, Y. H. Wu, L. C. Chang, and C. H. Cheng, "Direct Fabrication of Inkjet-Printed Dielectric Film for Metal-Insulator-Metal Capacitors," J. Electron. Mater., vol. 47, no. 1, pp. 677-683, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Alexandr Laposa, katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.02.2019** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Alexandr Laposa
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Rípkta, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

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 24. 5. 1019

.....

Vojtěch Povolný

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu mé diplomové práce Ing. Alexandru Laposovi, který mi věnoval mnoho svého času na konzultace a odbornou pomoc při realizaci praktické části. Poděkovat musím také své rodině, která mě vždy podporovala a stála při mně.

Anotace

Tato práce se zabývá výrobou a charakterizací tištěných kondenzátorů pomocí materiálového InkJet tisku.

V teoretické části je popsána technologie InkJet tisku, způsoby nanášení inkoustu pomocí této technologie a její základní výhody a nevýhody. Dále jsou zde popsány základní druhy tištěných kondenzátorů. Jsou zde také uvedeny problémy, které mohou nastat při tisku dielektrických materiálů.

Praktická část se zabývá samotným tiskem deskových a interdigitálních kondenzátorů na flexibilním substrátu a jejich následnou charakterizací. Dále jsou uvedeny návrhy pro řešení problému s tiskem dielektrickým materiálem c-PVP a návrhy dalších dielektrických materiálů, kterými by bylo vhodné provést tisk vícevrstevných struktur.

Klíčová slova

Inkjet, inkoustový tisk, tištěná elektronika, Dimatix, Interdigitální struktury, dielektrické vrstvy, MIM

Annotation

This work deals with the production and characterisation of printed material using InkJet printing of the capacitors.

In the theoretical part of the InkJet printing technology is described, the methods of application of ink with this basic technology and its advantages and disadvantages. Then there are the basic types of printed capacitors. There are also issues that may occur when you print dielectric layers.

The practical part is concerned with the printing of the plate and interdigital capacitors on a flexible substrate and their characterisation. The following are suggestions for the solution of the problem with printing dielectric material c-PVP, and suggestions for other dielectric materials, which would be a good idea to perform printing of multilayer structures.

Key words

Inkjet printing, Printed electronics, Dimatix, Interdigital structures, dielectric layers, MIM

1	Úvod	1
1.1	Cíle práce:	2
1.2	Inkjet technologie	3
1.3	Typy kondenzátorů	8
1.4	Rešerše aktuálního stavu tištěných deskových kondenzátorů	10
2	Příprava kondenzátorů	15
2.1	Materiály	15
2.2	Tisk kondenzátorů	20
2.3	Vytvrzování inkoustů	24
3	Charakterizace natisknutých vzorků	27
3.1	Naměřené hodnoty	27
3.2	Křížení vodivých cest	49
4	Srovnání výsledků, návrh dalšího postupu	51
4.1	Zhodnocení dosažených výsledků	51
5	Závěr	55
6	Použitá literatura a zdroje	57
	Seznam Příloh	60
	A) Vybavení laboratoře	
	B) Grafy deskových kondenzátorů	
	C) Diagram procesu Inkjet tisku	
	D) Ukázky realizovaných struktur	

Seznam použitých zkratek a pojmů

Zkratka	Význam
MIM	Metal – Insulator –Metal
PLED	Polymerní LED dioda
MEMS	Mikro Elektro Mechanické Systémy
PEDOT/PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrenesulfonate)
BaTiO₃	Barium titanate
UV	Ultra-Violet
c-PVP	Cross-linked poly-4-vinylphenol
PGMEA	Propylene glycol monomethyl ether Acetate
PMFM	Melamine-co-formaldehyde
SEM	Scanning electron microscope
PET	Polyethylene terephthalate
PEN	Polyethylene naphthalate

Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Procesní diagram výroby tištěných pasivních součástek, převzato, upraveno z [16]	3
Obr. 2 Porovnání litografického procesu nanášení vrstev a InkJet tisku, upraveno z [17]	4
Obr. 3 Mapa základních oblastí InkJet tisku, které jsou nutné pro kvalitní tisk.....	4
Obr. 4 Způsoby vytlačování inkoustu ven z cartridge - a) termální způsob, b) piezoelektrický, c) elektrostatický, převzato z [21]	6
Obr. 5 Tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831 a ovládací PC	7
Obr. 6 Ukázka dropwatcheru tiskárny s vylétávajícími kapkami inkoustu	8
Obr. 7 Ukázka nastavení napěťového profilu piezoelektrického aktuátoru s popsány fázemi.....	8
Obr. 8 Ukázka siločar elektrického pole interdigitálního kondenzátoru, převzato z [23]	10
Obr. 9 Příklad motivů interdigitálních kondenzátorů.....	10
Obr. 10 3D zobrazení deskových kondenzátorů a) s jednou, b) s více vrstvami dielektrika, převzato z [16]	11
Obr. 11 Ukázka motivu tištěného deskového kondenzátoru s kruhovými elektrodami a obrázek vytištěného kondenzátoru na textilním substrátu převzato z [17]	11
Obr. 12 Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu deskového kondenzátoru s různými materiály inkoustu a bublinkami v dielektriku, převzato z [17]	12
Obr. 13 a) příčný řez polymerním kondenzátorem, b) motiv RC článku, c) snímek tištěného polymerního kondenzátoru, d) snímek tištěného polymerního RC článku, převzato z [10].....	13
Obr. 14 Napěťový profil inkoustu ANP DGP 736465	15
Obr. 15 Ukázka tvaru kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust ANP DGP 736465	16
Obr. 16 Napěťový profil inkoustu SU-8	17
Obr. 17 Ukázka tvaru kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust SU-8	17
Obr. 18 Napěťový profil inkoustu c-PVP.....	18
Obr. 19 Ukázka rychlosti kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust c-PVP	18
Obr. 20 Příklady možných vad při tisku dielektrických vrstev.....	19
Obr. 21 Snímek bubliny zachycené v dielektrickém materiálu SU-8 pořízený pomocí AFM	19
Obr. 22 Postup přípravy vrstvených motivů pomocí vodivých dielektrických inkoustů	20
Obr. 23 Motivy jednotlivých vrstev deskového kondenzátoru	21
Obr. 24 Tisk horní elektrody na dielektrický materiál SU-8	22
Obr. 25 Detail povrchu natištěného materiálu c-PVP z mikroskopu s patrnými bublinkami v dielektrické vrstvě.....	22
Obr. 26 Motiv interdigitálního kondenzátoru	23
Obr. 27 Detail natištěného motivu interdigitálního kondenzátoru. Na obrázku a) je přes vodivý inkoust nanesena ještě vrstva dielektrického materiálu SU-8, na obrázku b) je pouze vrstva stříbrného inkoustu.....	23
Obr. 28 Motiv RC článků s a) interdigitálním a b) deskovým kondenzátorem.....	24
Obr. 29 Hloubka vniku UV záření u vrstev tištěného inkoustu, upraveno z [30]	25
Obr. 30 Spektrum osvitové jednotky.....	26
Obr. 31 Spektrum UV ozonu cleaneru [31]	26
Obr. 32 3D zobrazení interdigitálního kondenzátoru a, ve složeném a b) rozloženém tvaru.....	27
Obr. 33 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 se vzduchovým dielektrikem.....	28
Obr. 34 Kapacita interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz	28

Obr. 35 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 s dielektrikem SU-8	29
Obr. 36 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz	30
Obr. 37 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 s dielektrikem SU-8	31
Obr. 38 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délkou prstů 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz	32
Obr. 39 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 se vzduchovým dielektrikem.....	33
Obr. 40 Závislost kapacity na délce prstu interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem pro hodnotu frekvence 1 kHz	34
Obr. 41 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem SU-8	34
Obr. 42 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 pro různé délky prstů.....	35
Obr. 43 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz	36
Obr. 44 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem c-PVP	36
Obr. 45 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP pro různé délky prstů.....	37
Obr. 46 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz	38
Obr. 47 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem SU-8 a c-PVP	38
Obr. 48 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8, c-PVP a vzduch pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz.....	39
Obr. 49 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem vzduch, SU-8, c-PVP a různou délkou prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz.....	40
Obr. 50 Závislost kapacity na frekvenci interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 a šířkou prstu a mezery 0,125 mm.....	40
Obr. 51 Motiv a foto interdigitálních kondenzátorů s šířkou mezery a prstu 0,125 mm.....	41
Obr. 52 3D zobrazení deskového kondenzátoru a) v reálném složeném tvaru a b) v rozloženém – exploded tvaru	41
Obr. 53 Motiv jednotlivých vrstev deskových kondenzátorů a konečné sestavy	42
Obr. 54 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na ploše elektrod s lineárním proložením.....	42
Obr. 55 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na frekvenci pro různé plochy elektrod	43
Obr. 56 Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika tištěného rozlišením 1016 dpi pro hodnotu frekvence 1 kHz.....	44
Obr. 57 Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika tištěného rozlišením 1693 dpi pro hodnotu frekvence 1 kHz.....	45
Obr. 58 Závislost kapacity deskových kondenzátorů rozlišení tisku dielektrika, resp. vzdálenosti elektrod	45
Obr. 59 Schématické zapojení RC článku s vyobrazením parazitní kapacity.....	46
Obr. 60 RC článek s interdigitálním kondenzátorem.....	46
Obr. 61 Frekvenční závislost přenosu RC článku s interdigitálním kondenzátorem	47
Obr. 62 RC článek s deskovým kondenzátorem	47
Obr. 63 Frekvenční závislost přenosu RC článku s deskovým kondenzátorem.....	48
Obr. 64 Odezva RC článku na obdélníkový budící signál	49
Obr. 65 Motiv jednotlivých vrstev pro tisk křížení vodivých cest a konečné sestavy	50
Obr. 66 Natištěné struktury s křížením vodivých cest. U širších motivů docházelo k rozlévání inkoustu	50

Obr. 67 Detail křížení vodivých cest pořízený mikroskopem	50
Obr. 68 Příklad plně tištěného senzoru s integrovaným výhřevem. A) 3D pohled, b) řez strukturou s jednotlivými vrstvami. Převzato, upraveno z [36]	53
Obr. 69 Návrh tištěného tranzistoru; a) 3D zobrazení, b) schématická značka, c) pohled shora, d) průřez vrstvami tištěného tranzistoru. Převzato, upraveno z [38]	53

Seznam použitých tabulek

Tab. 1 Tabulka vlastností stříbrného inkoustu ANP DGP 736465	15
Tab. 2 Základní vlastnosti materiálu SU-8 [26].....	16
Tab. 3 Základní vlastnosti PET folie [29].....	20
Tab. 4 Druhy UV záření s jednotlivými hodnotami vlnové délky, energie a hloubky vniku	25
Tab. 5 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů	28
Tab. 6 Tabulka průměrných naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem.....	28
Tab. 7 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů	29
Tab. 8 Tabulka průměrných naměřených hodnot pro vzorky 2 a 5 s různým počtem vrstev dielektrika c-PVP.....	29
Tab. 9 Tabulka závislosti kapacity na počtu vrstev dielektrika c-PVP pro interdigitální kondenzátor s šířkou prstu i mezery 0,5 a 1 mm a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz	30
Tab. 10 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů	31
Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot pro vzorky 2 a 5 s různým počtem vrstev dielektrika SU-8	31
Tab. 12 Tabulka závislosti kapacity na počtu vrstev dielektrika SU-8 pro interdigitální kondenzátor s šířkou prstu 0,5 mm a šířkou mezery 0,5 a 1 mm a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz	32
Tab. 13 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů	33
Tab. 14 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem	33
Tab. 15 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů	35
Tab. 16 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8.....	35
Tab. 17 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů	37
Tab. 18 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP	37
Tab. 19 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů	39
Tab. 20 Tabulka naměřených hodnot kapacity deskových kondenzátorů s různou plochou elektrod pro hodnotu frekvence 1 kHz	42
Tab. 21 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na frekvenci pro různé plochy elektrod	43
Tab. 22 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na počtu vrstev pro rozlišení tisku dielektrika 1016 dpi.....	43
Tab. 23 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na počtu vrstev pro rozlišení tisku dielektrika 1693 dpi.....	44

1 Úvod

Při výrobě mikroelektronických součástek se využívá mnoho různých výrobních technologií, jako například litografie, spin coating, napařování, naprašování, mokré a suché leptání atd. V posledních letech se často také využívá technologie tisku. Právě technologie tisku zahrnující sítotisk [1][2], tisk mikrokontaktů [3][4] a inkjet tisk [5] jsou pro nízké výrobní náklady ve velké oblibě. Ze zmíněných technik se nejvíce zájmu věnuje právě inkjet tisku, protože součástky vyrobené pomocí této technologie mají oproti konvenčním nesporné výhody v jednoduchosti výroby, mezi které lze zařadit: velkou škálu použitelných substrátů, bezkontaktní nanášení výsledného motivu bez masky, nízkoteplotní zpracování bez nutnosti použití vakua a nízkou cenu. Pomocí Inkjet tisku byl vyroben i zcela polymerní tranzistor [5], [6], polymerní LED dioda (PLED) [7], [8] a nanočásticové Mikro Elektro Mechanické Systémy [9], polymerní kondenzátor [10].

V posledních zhruba deseti letech získala technologie inkjet tisku velkou popularitu jako metoda výroby elektronických součástek v celé řadě výzkumných a průmyslových oblastí. Využití systému nanášení materiálu drop-on-demand neboli na vyžádání představuje pro inkjet tisk významnou výhodu a umožňuje zpracování elektronických materiálů plně aditivní metodou. V porovnání s typickými elektronickými metodami výroby eliminuje inkjet potřebu použití čistých prostor, tvorbu nebezpečných chemických odpadů a drahé fotolitografické masky [11]. Technologie inkjet tisku umožňuje potenciálně přímé, nízkonákladové, bezkontaktní řešení pro realizaci elektronických obvodů a senzorů a jiných součástek na flexibilních a textilních substrátech. Vývoj procesů spojených s inkjet tiskem, jako například vytvrzování při nízké teplotě (<150 °C), která je šetrná k substrátu a nedochází tak k jeho poškození, má zásadní roli v dosažení pokročilých tištěných systémech, například pro nositelnou elektroniku.

Pokrok ve vývoji inkoustů vedl k realizaci čistě vodivých vrstev. Stejně úsilí je však věnováno také dielektrickým materiálům. Dielektrické vrstvy jsou nezbytné pro výrobu mnoha elektronických součástek a jsou děleny do dvou základních skupin podle jejich tloušťky po natištění: tenké (< 1 μ m) a tlusté (> 1 μ m). Tenké dielektrické vrstvy jsou nezbytné pro tisk nízko profilových součástek, kterými jsou například deskové kondenzátory a organické tranzistory. Kombinací vodivých nanočásticových inkoustů s dielektrickými inkousty lze pomocí inkjet tisku kompletně vyrobit elektronické součástky čistě aditivním procesem. [12]

Nanášení silných vrstev je nedílnou součástí velké škály elektronických aplikací. Inkoustový tisk silných dielektrických struktur umožňuje realizaci výroby vícevrstvých zařízení pomocí selektivního modelování a depozice. Dielektrické vrstvy nacházejí využití v takových vícevrstvých aplikacích, jako jsou antény, vlnovody nebo přemostění již natištěných vodivých cest. [13]–[15]

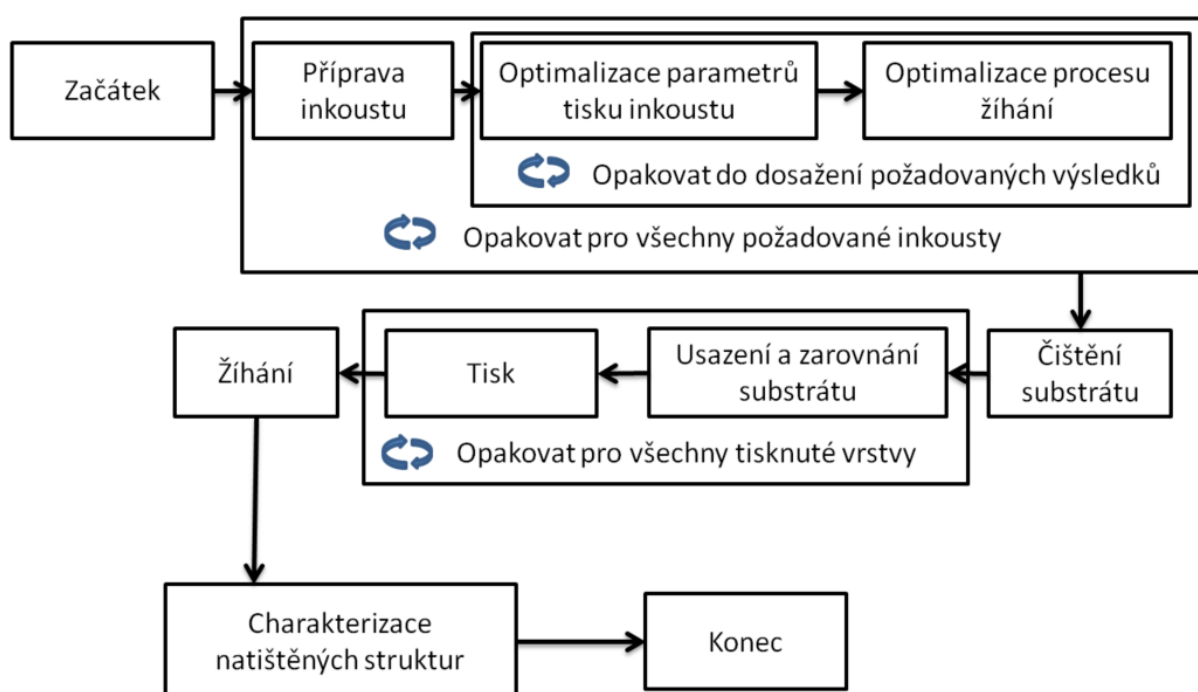
1.1 CÍLE PRÁCE:

- Seznámit se s aktuálním stavem vývoje v oblasti tištěných kondenzátorů pro flexibilní elektroniku. Tomuto tématu je věnována kapitola 1.
- Uvést možnosti dielektrických materiálů vhodných pro výrobu kondenzátorů, zejména materiálů kompatibilních s nízkoteplotními tiskovými metodami. Tomu se věnuje kapitola 2.1.
- Na základě získaných poznatků z kapitol 1 a 2 navrhnout postup výroby tenkovrstvých kondenzátorů tištěných technologií inkjet. Tomuto tématu je věnována kapitola 2.2. Výsledný návrh byl následně použit pro realizaci tištěných kondenzátorů.
- Charakterizovat připravené kapacitory, analyzovat dosažené výsledky a optimalizovat proces přípravy. Tato témata jsou uvedena v kapitole 3.

1.2 INKJET TECHNOLOGIE

Inkjet tisk je bezkontaktní technologie nanášení materiálů umožňující depozici vodivých, funkčních a nevodivých inkoustů (například pro tisk vodičů, izolátorů / dielektrik nebo polovodičů). Okamžitě lze tisknout motivy navržené uživatelem bez nutnosti použití masky, nebo jiných leptacích technik. Po nanesení inkoustu na substrát následuje proces vytvrzování inkoustu. K vytvrzování se využívají dvě základní metody: vytvrzování pomocí tepla a UV záření. Tyto metody jsou podrobněji popsány v kapitole 2.3 – Vytvrzování inkoustů. Inkjet tisk je univerzální prototypový nástroj s možností vyrábět různé dvou a kvazi trojrozměrné tvary a součástky (jako Mikro Elektro Mechanické Systémy – MEMS)[9]

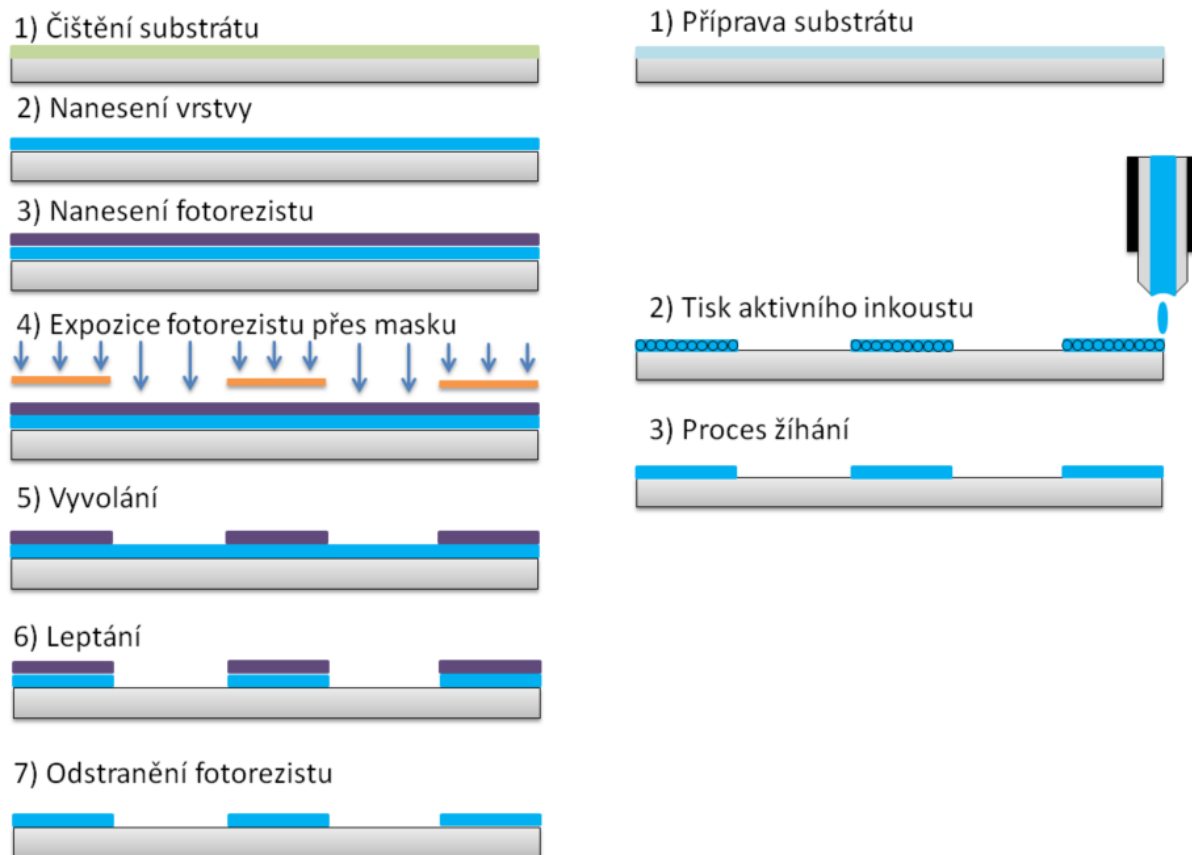
Na Obr. 1 je vyobrazen chronologický postup procesu inkjet tisku. Jak je vidět, pro dosažení kvalitních výsledků je zapotřebí provést mnoho kroků a věnovat technologii dostatek nutného času především na počátku při odlaďování parametrů inkoustů a nastavení tiskárny.



Obr. 1 Procesní diagram výroby tištěných pasivních součástek, převzato, upraveno z [16]

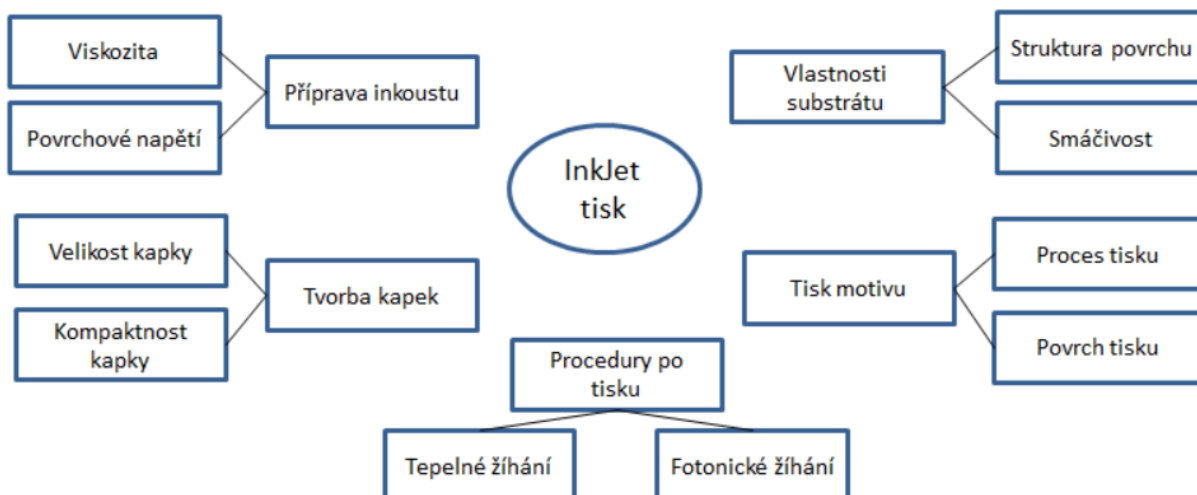
Ve srovnání s běžnou/konvenční výrobní technikou, která zahrnuje náročné techniky jako výrobu masky, nanášení citlivých vrstev a leptání, inkjet tisk výrazně redukuje počet procesních kroků, spotřebu energie a produkci odpadu, jak je vidět na Obr. 2.

Úvod



Obr. 2 Porovnání litografického procesu nanášení vrstev a InkJet tisku, upraveno z [17]

V souvislosti s inkjet tiskem je používán také termín all-inkjet tisk. Jde o takové použití inkjet technologie, kdy je každá vrstva z výsledného zařízení nanášena inkjet tiskem bez pomoci jiných dalších depozičních metod. Použití jediné depoziční metody je jednoznačně výhodné z hlediska výroby. Oblastí, kterým je třeba se věnovat pro dosažení nejen požadovaného výsledku pro konkrétní tisk, ale pro celý spolehlivý proces, který bude možné nadále bez problémů opakovat, je velmi mnoho. Několik jich je zobrazeno na Obr. 3, detailní vyobrazení se pak nachází v příloze.



Obr. 3 Mapa základních oblastí InkJet tisku, které jsou nutné pro kvalitní tisk

Úvod

Při výrobě kondenzátorů bylo vyzkoušeno mnoho postupů. Některé využívají kromě inkjet tisku další výrobní metody [18], jiné využívají pevných substrátů [10], [19], nebo vyžadují vysokou teplotu vytvrzování (>280 °C), která je však příliš vysoká pro většinu flexibilních materiálů. Jedna z publikací [18] uvádí použití vodivého materiálu polymerní inkoust Poly (3,4-ethylenedioxy thiophene)-poly (styrenesulfonate) (PEDOT/PSS) na dvou ohebných PET foliích k vytvoření vodivých elektrod. Ethyl-2-kyanoakrylátové lepidlo bylo použito pro spojení těchto dvou folií a vytvoření dielektrika výsledného kondenzátoru. V publikaci [10] je popsána výroba kondenzátorů pomocí polymeru PEDOT/PSS a polyimidu (roztok kyseliny amidové) jako dielektrika na pevném substrátu pomocí inkjet tisku. V roce 2011 [19] byl vyroben plně tištěný kondenzátor na pevném hliníkovém substrátu s použitím vodivého inkoustu s částicemi stříbra, který je vytvrzovaný při teplotě 370 °C a dielektrického inkoustu BaTiO₃, který byl vytvrzován při teplotě 280 °C.

Inkjet tisk lze využít také pro tisk na tkaninu. V závislosti na druhu použité tkaniny, respektive PET folie a substrátu obecně je ideální teplota žhání 100-150 °C. Tyto teploty jsou již dostatečné k tomu, aby nedošlo k poškození substrátu. V případě tištěných kondenzátorů jsou významnými parametry tloušťka, pravidelnost a vlastnosti dielektrika, které významně ovlivní jeho vlastnosti. Inkousty vytvrzované pomocí UV světla (např. akryláty a SU-8) tvoří při tisku silné dielektrické vrstvy, okolo 7 μm po vytvrzení na 1 tištěnou vrstvu. [20] Typicky jsou vyžadovány dvě až tři vrstvy, aby nedocházelo k vzniku děr v natištěných vrstvách, což může dále způsobit zkrat mezi elektrodami nebo může zhoršit dielektrické vlastnosti. Více natištěných dielektrických vrstev však vylučuje jejich použití v jiných tištěných aplikacích, jako jsou například tištěné tranzistory. Inkousty vhodné pro inkjet tisk založené na rozpouštědlech mohou být nanášeny v tenkých vrstvách, obvykle ale vyžadují vyšší teploty žhání. Například teplem vytvrzovaný materiál PVP vyžaduje teplotu 200 °C [17] Proto jsou inkousty vytvrditelné UV zářením za pokojové teploty v širokém zájmu výzkumu.

Rychlost tisku inkoustových tiskáren je v závislosti na rozlišení tisku poměrně velká, proto je vhodné tuto technologii dále zkoumat jako alternativní způsob prototypování tištěné elektroniky.

1.2.1 Kategorie InkJet tisku

Dnes jsou na trhu dostupné dva druhy technologie InkJet tisku, konkrétně kontinuální tisk a tisk na vyžádání – drop-on-demand. Kontinuální tisk lze dále dělit na binární vychýlení a vícenásobné vychýlení. Tisk na vyžádání se pak dělí na termální, piezoelektrické a elektrostatické. Více jsou jednotlivé typy popsány v následujících podkapitolách.

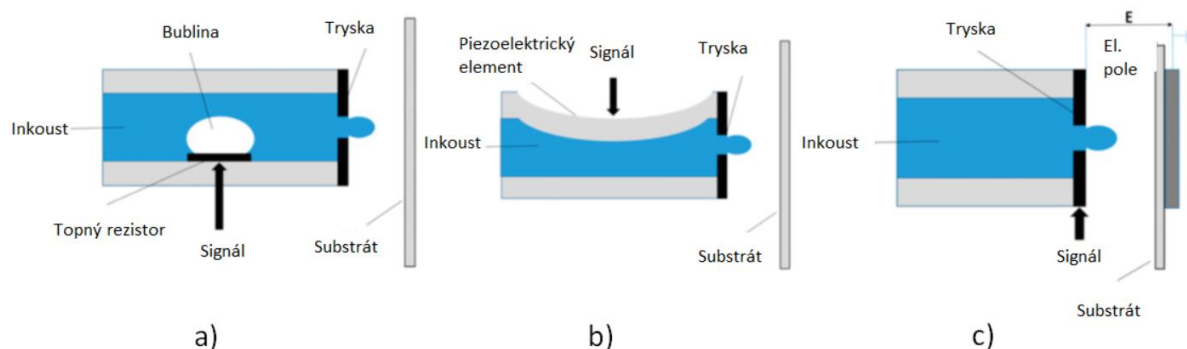
1.2.1.1 Kontinuální tisk

Jde o proces, kdy tryska neustále chrlí kapky inkoustu a pomocí elektrostatických sil deflektor vychyluje vylétávající kapky na požadovaná místa na substrátu. Pro binární vychýlování mohou být dále kapky buď nabité, nebo bez náboje. Kapky bez náboje jsou primárně určeny k tomu, aby dopadly na substrát, kdežto nabité kapky mohou být vychýlovány do sběrného žlabu. Pro vícenásobné vychýlování jsou kapky nabitý na různou hodnotu, proto když se dostanou do elektrického pole, jsou vychýlovány do různých směrů.

1.2.1.2 Tisk na vyžádání

V tomto případě vylétávají kapky, jen když je to zapotřebí dle zvoleného motivu. Tento proces je dále klasifikován podle způsobu, kterým se kapky dostávají z cartridge: termální, piezoelektrický a elektrostatický způsob tisku. Jednotlivé způsoby jsou vidět na Obr. 4

Úvod



Obr. 4 Způsoby vytlačování inkoustu ven z cartridge - a) termální způsob, b) piezoelektrický, c) elektrostatický, převzato z [21]

U termálního způsobu dostane tepelný rezistor signál k tomu, aby začal ohřívat a odpařovat inkoust a vytvořil tak bublinu, která vytlačí inkoust tryskou ven. U piezoelektrického způsobu obsahuje tisková hlava piezoelektrický keramický aktuátor k tomu, aby vytlačila inkoust z trysky. Aktuátor se začne deformovat po přiložení napětí. Deformace vyvolají tlakovou vlnu uvnitř inkoustové komory a vytlačí tak inkoust z trysky, který dopadne na substrát. U elektrostatického způsobu je vylétávání kapek způsobeno elektrostatickými silami mezi vodivým inkoustem a deskou nad substrátem. Se změnou přiloženého napětí dochází k vytlačování inkoustu, který dopadá na substrát.[21]

1.2.2 Výhody a nevýhody InkJet tisku

Výhody

- Bezkontaktní metoda nanášení materiálu bez masky
- Nízká možnost kontaminace a poškození tisknutých součástí
- Nízká spotřeba materiálu
- Možnost použití jak pevných, tak ohebných substrátů
- Umožňuje více vrstvé a více materiálové motivy

Nevýhody

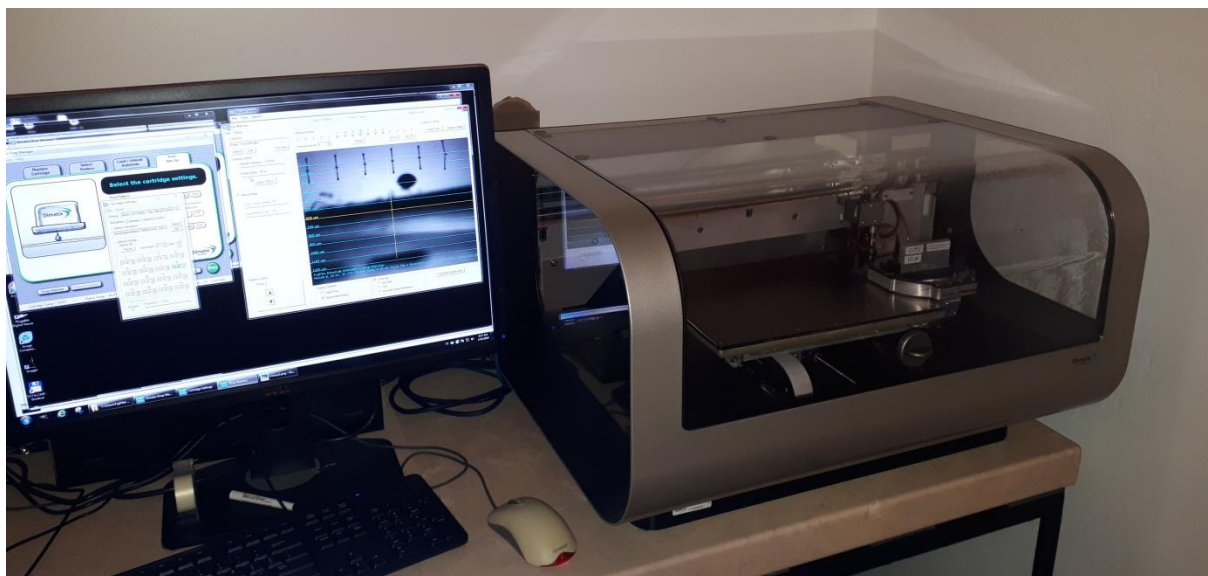
- Ucpávání trysek
- Nutné použít inkousty s danou viskozitou a povrchovým napětím
- Pro dosažení požadované tloušťky je nutné nanést více vrstev materiálu
- Není vhodné používat nerovné substráty
- Nižší průchodnost oproti běžným technikám
- Coffee-ring efekt může způsobovat nechtěnou distribuci nanášeného materiálu

1.2.3 Tiskárna

Pro tisk byla použita tiskárna Fujifim Dimatix DMP 2831, Obr. 5, využívající cartridge o objemu 1,5 ml a objem vylétávající kapky 10 pl. Inkousty musí splňovat daná kritéria, aby je bylo možné použít k tisku a nedocházelo například k ucpávání trysek. Ideální inkoust pro tuto tiskárnu je stabilní suspenze s nízkou hodnotou vypařování, viskozitou od 10 do 12 cPs a povrchovým napětím od 0,028 do 0,042 N/m. Rozlišení tištěných vzorů lze měnit pomocí změny rozteče dopadajících kapek a to mezi 5

Úvod

až 254 μm . Při malém rozestupu kapek však může vlivem nanášení více materiálu docházet k rozlévání inkoustu a tím k deformaci požadovaného motivu.[20] Tiskárna dále disponuje podtlakovým systémem přidržování substrátů, který je možno vyhřívat až na 60 °C.

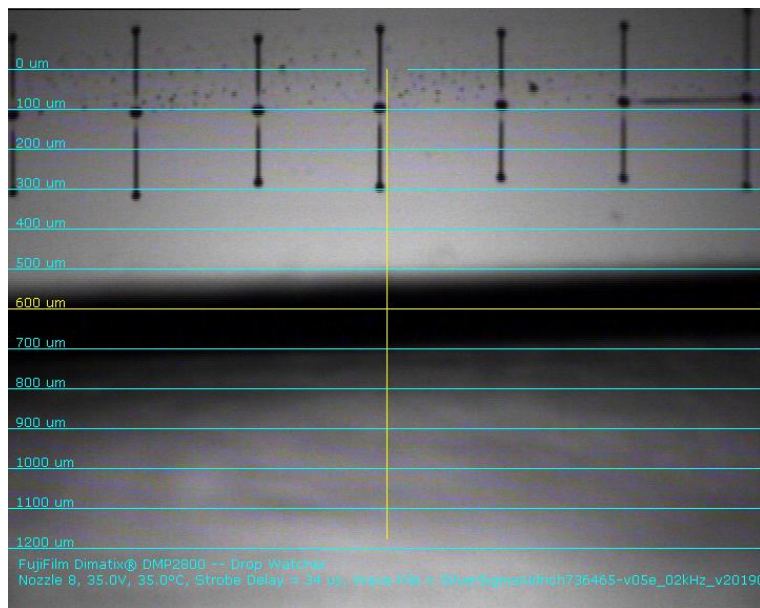


Obr. 5 Tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831 a ovládací PC

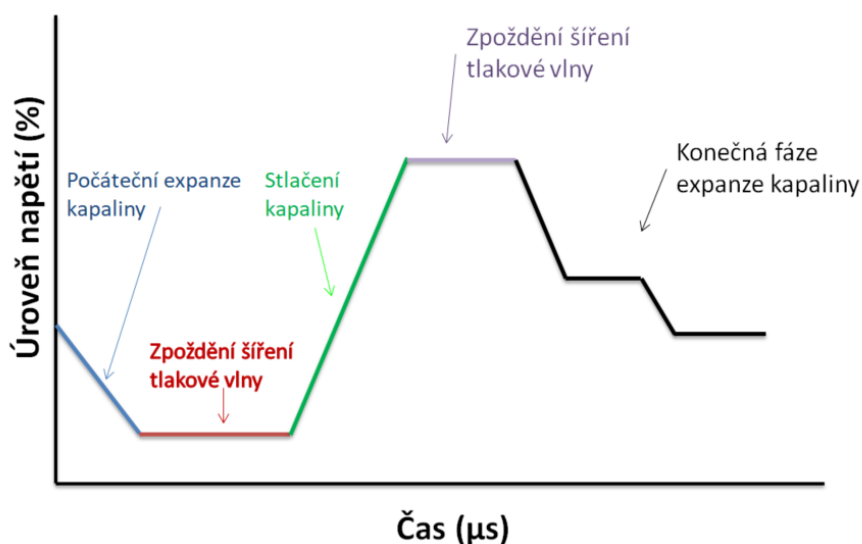
Vlastnosti inkoustu, které je nutné dodržet pro kvalitní tisk, jsou shrnuty v následujících bodech:

- 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 μm (1/100 velikosti trysek)
- Bod varu: doporučen vyšší než 100° C
- Hustota: Větší než 1 g·cm⁻³

Pro kontrolu jednotlivých trysek cartridge se používá funkce drop watcher, která je součástí softwaru tiskárny. Lze jím pozorovat, zda nejsou některé trysky ucpané a dochází k vylétávání kapek v přímém směru a požadovanou rychlostí. Ukázka drop watcheru je k vidění na Obr. 6. Případné změny lze provádět v nastavení napěťového profilu piezoelektrického aktuátoru pro daný inkoust. Ukázka je vidět na Obr. 7.



Obr. 6 Ukázka dropwatcheru tiskárny s vylétávajícími kapkami inkoustu



Obr. 7 Ukázka nastavení napěťového profilu piezoelektrického aktuátoru s popsanými fázemi

1.3 TYPY KONDENZÁTORŮ

Kondenzátor patří do oblasti pasivních součástek a využívá se především k filtrování signálů nebo pro dočasné uchování elektrického náboje v elektrických obvodech.

Jednotkou kapacity je farad [F], může být vyjádřena také v coulombech na volt [C/V].

Úvod

1.3.1 Deskové kondenzátory

Deskové kondenzátory se skládají ze dvou vodivých elektrod, mezi kterými je izolační vrstva. Tato vrstva může být například vzduch nebo jiný dielektrický materiál. Základní vlastností kondenzátoru je kapacita, což je poměr náboje uloženého v kondenzátoru k rozdílu potenciálu napříč kondenzátorem. Tento vztah je vyjádřen v rovnici (1)

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad 1)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru, Q je náboj uložený v kondenzátoru vyjádřený v Coulombech [C] a ΔV rozdíl potenciálu napříč kondenzátorem. Kapacita kondenzátoru může být také vypočtena pomocí materiálových a geometrických parametrů kondenzátoru: relativní permitivita dielektrické vrstvy ϵ_r , permitivita vakua ϵ_0 , plocha vodivých desek A a vzdálenost mezi těmito deskami d; jak je vidět v rovnici (2)[21]

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad 2)$$

1.3.2 Interdigitální kondenzátory

Inter-digitální kondenzátory se skládají rovněž ze dvou vodivých desek a vrstvy izolantu jako deskové kondenzátory, jednotlivé vrstvy však nejsou vrstveny na sebe. Vodivé elektrody leží vedle sebe a jsou odděleny dielektrikem. Rovněž se může jednat o vzduch nebo jiný dielektrický materiál. Z hlediska ochrany a stabilizace parametrů je vhodné elektrody překrýt dielektrickým materiálem. Pro zvětšení plochy a tím i kapacity interdigitálního kondenzátoru mají desky kolmé prsty, které se vždy střídají od jednotlivých elektrod. Takové struktury je pak při vhodně zvolené horní dielektrické vrstvě možné použít jako senzory plynů, vlhkosti, nebo přímo výšky hladiny kapaliny.

Kapacita interdigitálního kondenzátoru závisí na materiálových vlastnostech substrátu a dielektrika (permitivita, vodivost), které je nanášeno na motiv interdigitální struktury. Výsledná kapacita je pak dána kapacitami mezi jednotlivými elektrodami, jejíž velikost ovlivňují parametry: šířka elektrody-prstů, tloušťka elektrody a především vzdálenost mezi sousedními elektrodami. Největší kapacity na jednotkovou plochu lze získat s úzkými elektrodami umístěnými blízko u sebe. Pokud je substrát z izotropního materiálu, lze kapacitu odvodit ze vztahu (3).

$$C_{uc} = \epsilon_0(\epsilon_r + \epsilon_k) \frac{K(\sqrt{1 - (\frac{W}{G})^2})}{K \frac{W}{G}} + 2\epsilon_0\epsilon_k \frac{\tau}{W} \quad 3)$$

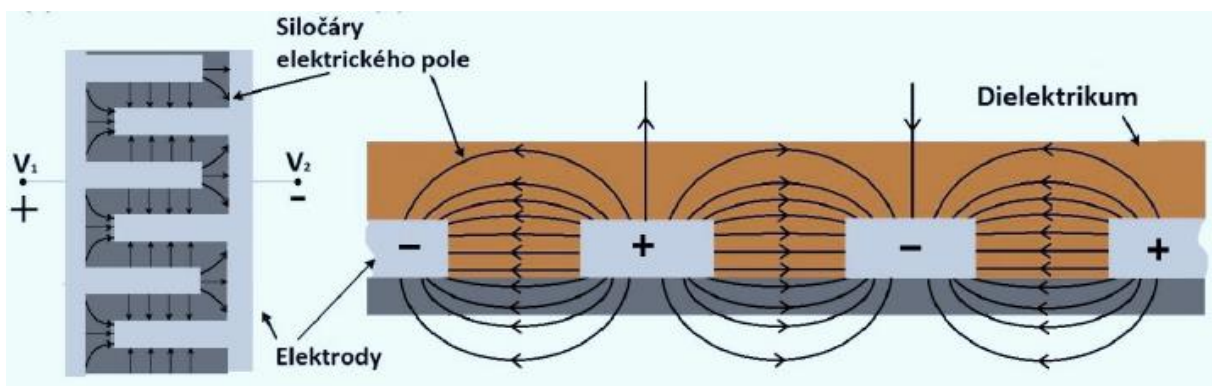
Úvod

kde ϵ_0 je permitivita vakua, ϵ_r a ϵ_k jsou permitivity substrátu a dielektrika. K je úplný eliptický integrál první třídy. Pro výpočet celkové kapacity lze pak využít vztah (4).

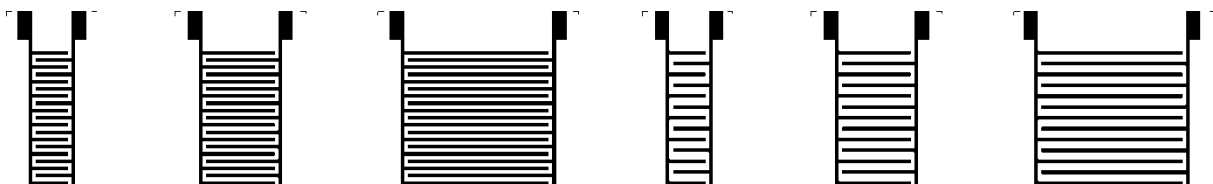
$$C_{celk} = C_{uc}(N - 1)L \quad 4)$$

kde N je počet prstů na ploše vodivých elektrod a L je délka prstů.[22]

Elektrické pole, které vzniká mezi elektrodami, má směr od kladné elektrody k záporné a proniká jednak do substrátu, ale také to dielektrické vrstvy. V případě tenkých vrstev vystupuje z materiálu a šíří se i v jeho okolí, jak je graficky znázorněno na Obr. 8. Příklad motivu interdigitálních kondenzátorů je na Obr. 9. Tento motiv byl použit i v praktické části.



Obr. 8 Ukázka siločar elektrického pole interdigitálního kondenzátoru, převzato z [23]



Obr. 9 Příklad motivů interdigitálních kondenzátorů

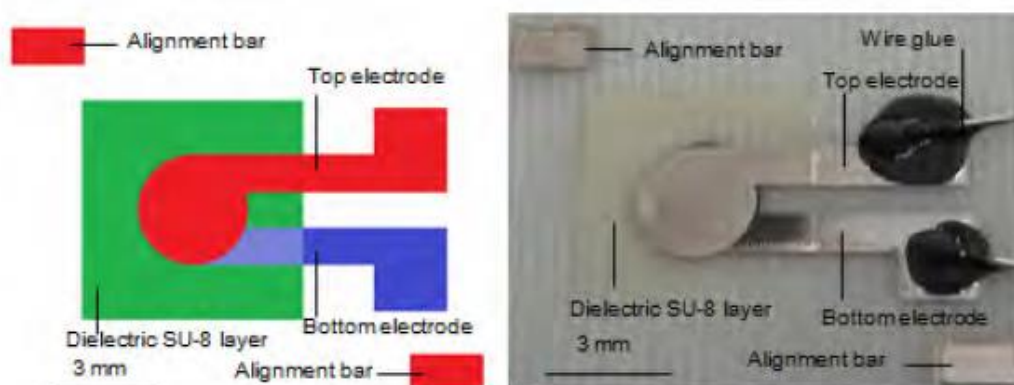
1.4 REŠERŠE AKTUÁLNÍHO STAVU TIŠTĚNÝCH DESKOVÝCH KONDENZÁTORŮ

V publikaci [16] byly technologií inkjet, konkrétně tiskárnou Fujifilm Dimatix DMP 3000, tištěny deskové kondenzátory. Jako substrát byla použita PEN folie s tloušťkou 125 μm . Byl zde použit nanočásticový stříbrný inkoust UTDAgJ1. Dielektrikum bylo tištěno materiálem c-PVP. Tištěny byly jak kondenzátory s jednou vrstvou dielektrického materiálu, tak i se třemi vrstvami, jak je vidět na Obr. 10. Plocha elektrod v tomto případě byla 2,5 x 2,5 mm^2 a 5 x 5 mm^2 . Hodnoty kapacity v tomto případě dosahovaly hodnot od 2 nF/cm^2 pro kondenzátor s jednou vrstvou dielektrika až po 3,1 nF/cm^2 pro více vrstvý kondenzátor.

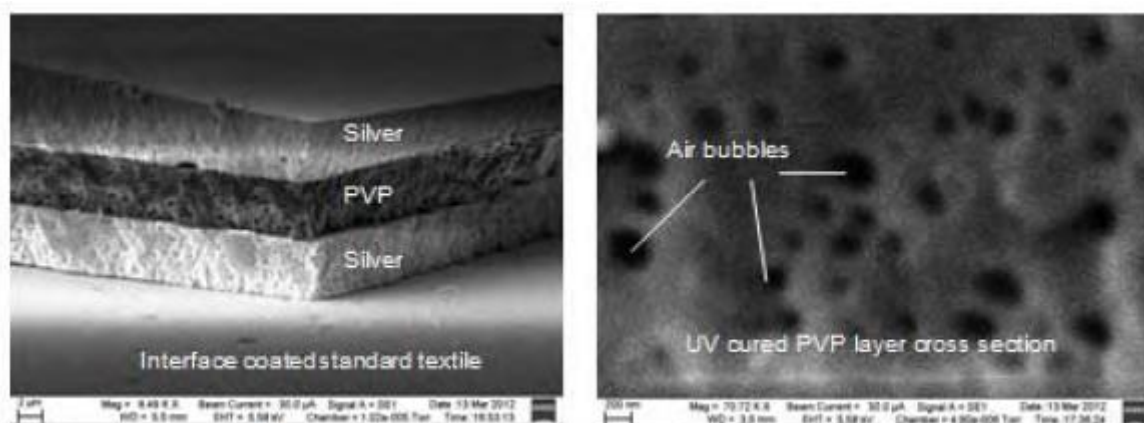


Obr. 10 3D zobrazení deskových kondenzátorů a) s jednou, b) s více vrstvami dielektrika, převzato z [16]

V publikaci [17] byl deskový kondenzátor s kruhovými vodivými deskami natištěn na textilní substrát polyester/vlna. K tisku byla použita tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831. Substrát byl nejprve potištěn vrstvou polyuretanu, aby se zmenšila původní savost a hrubost textilního materiálu. Následně byla natištěna spodní elektroda kondenzátoru stříbrným inkoustem U5414 od firmy Sun Chemical. Následoval tisk dielektrika materiálem PVP. Po vytvrzení byla natištěna horní elektroda. Průměr vodivých elektrod byl 3 mm. Hodnota kapacity se v tomto případě pohybovala v rozmezí od 113 pF při 9 MHz do 163 pF při 100 Hz. Schéma a realizovaný kondenzátor je na Obr. 11. Zajímavý je snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu, který ukazuje řez strukturou, tloušťky materiálu a defekty v podobě děr ve vrstvě PVP způsobené praskáním vzduchových bublin v materiálu, jak je vidět na obrázku Obr. 12.



Obr. 11 Ukázka motivu tištěného deskového kondenzátoru s kruhovými elektrodami a obrázek vytištěného kondenzátoru na textilním substrátu převzato z [17]



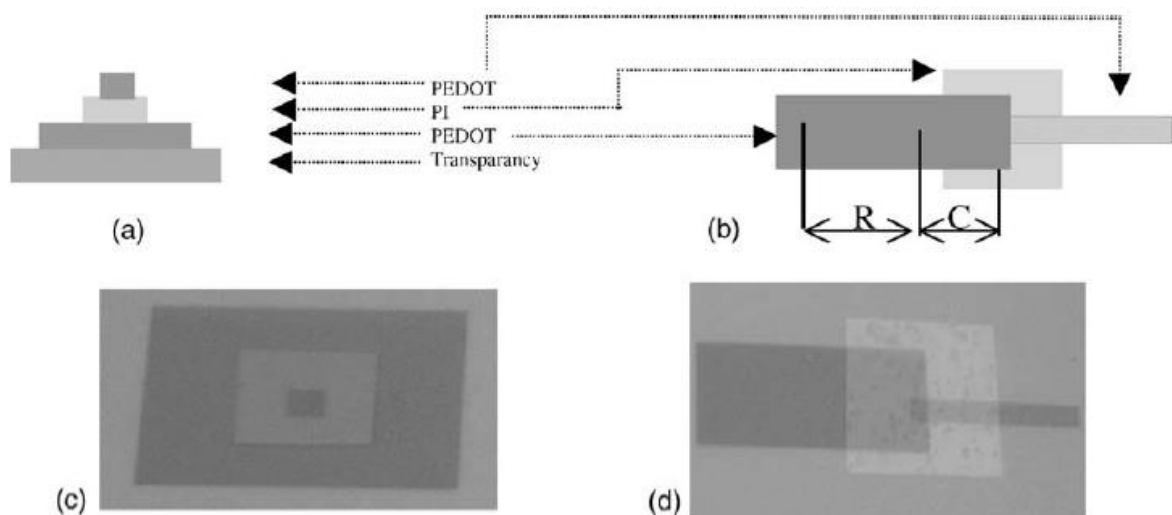
Obr. 12 Snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu deskového kondenzátoru s různými materiály inkoustu a bublinkami v dielektriku, převzato z [17]

V další publikaci [11] byly tištěny deskové kondenzátory formou křížení vodivých desek. Do dielektrického materiálu PVP byl přidán pro zvýšení dielektrické konstanty prášek BaTiO₃ s průměrnou velikostí částic 100 nm. Uváděná dosažená dielektrická konstanta pro PVP je 3,6 a pro PVP s přimíchaným práškem BaTiO₃ (20 % hmotnostní poměr) bylo dosaženo dielektrické konstanty 7,4. Tisk probíhal na tiskárně vlastní výroby s tryskou o průměru 100 μm . Rozlišení tisku zde není uvedeno. Vrstva PVP byla vytvrzována při teplotě 210 °C po dobu 60 min. Takto vysokých teplot bylo možné použitím polyimidového substrátu, který má vysokou tepelnou vodivost až do 350 °C. Tloušťka jedné vrstvy materiálu PVP je udávána 1 μm a dosažené kapacity při ploše desek 0,8 x 1 mm je 66 pF.

Další publikace [24] srovnává hodnoty kapacit deskových kondenzátorů vyrobených s dielektriky PVP a SU-8 2002. Rozestup jednotlivých kapek při tisku vrstvy SU-8 2002 byl 30 μm a při tisku PVP byl 20 μm . Dosažené tloušťky byly 4, respektive 0,8 μm . Kapacita kondenzátorů s plochou desek 1,5 mm x 1,5 mm byly 20 pF pro SU-8 a 50 pF pro PVP.

Pomocí Inkjet tisku byl vyroben i zcela polymerní kondenzátor [10]. Vodivé elektrody byly tištěny vodivým polymerem poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) vhodným pro inkjet tisk a jako dielektrický materiál byl použit Polyimid (PI). Na Obr. 13 je vidět i realizace RC článku. V tomto případě dosahovala hodnota kapacity 53 pF.

Úvod



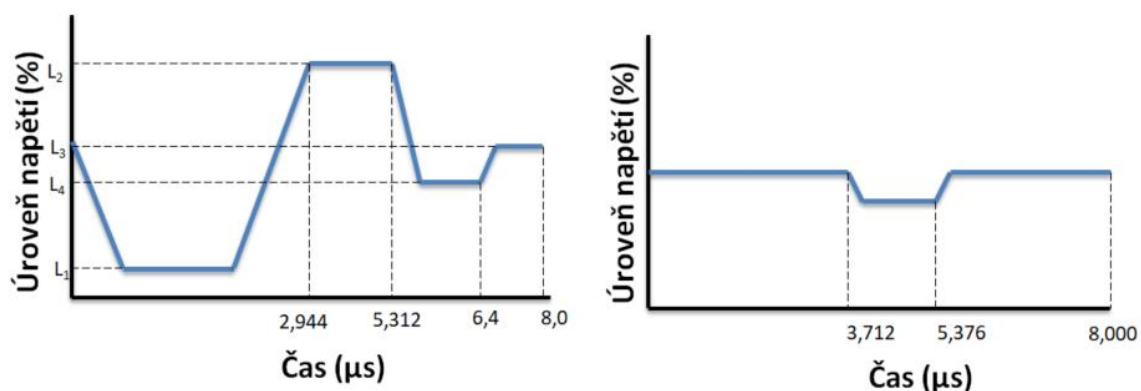
Obr. 13 a) příčný řez polymerním kondenzátorem, b) motiv RC článku, c) snímek tištěného polymerního kondenzátoru, d) snímek tištěného polymerního RC článku, převzato z [10]

2 Příprava kondenzátorů

2.1 MATERIÁLY

2.1.1 Vodivé materiály

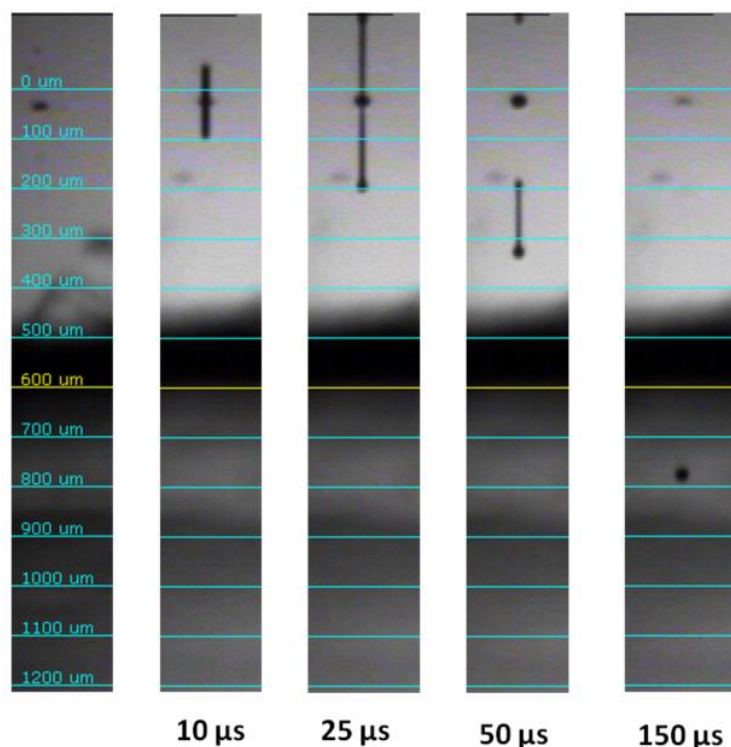
Vodivé desky kondenzátoru byly natištěny za pomoci inkoustu ANP DGP-40LT-15C PN 736465 dodané společností Sigma Aldrich s nanočásticemi stříbra, který obsahuje 30-35 % hmotnostní podíl nanočástic stříbrného prášku v triethylene glycol monomethyl etheru. Teplota žihání je u tohoto inkoustu v rozmezí 100-150 °C. [25] Vlastnosti inkoustu jsou shrnuty v Tab. 1. Inkoust je skladován při teplotě do 7 stupňů, aby nedocházelo jeho degradaci. Před tiskem je nutné nechat cartridge s inkoustem ohřát na okolní teplotu, aby nedocházelo k teplotním šokům. Vždy před začátkem a po ukončení používání inkoustu je cartridge očištěna izopropylalkoholem, aby nedocházelo k zasychání inkoustu a tím ucpávání trysek a bylo možné kdykoliv bez problému tisknout. Na Obr. 14 je vidět použitý napěťový profil piezoelektrického aktuátoru při tisku. Na Obr. 15 jsou vidět kapky vylétávající z cartridge ve vybraných časech.



Obr. 14 Napěťový profil inkoustu ANP DGP 736465

Tab. 1 Tabulka vlastností stříbrného inkoustu ANP DGP 736465

Stříbrný inkoust DGP-40LT-15C	
Forma	Nanočástice, disperze
Koncentrace	30 až 35 % hmotn. v triethylenglykolmonomethyletheru
Odpor	11 μΩ-cm
Povrchové napětí	0,035 -0,04 N/m
Velikost částic	≤50 nm
Viskozita	10-18 cP
Hustota	1.45 g/mL ± 0.05 g/mL at 25 °C
Skladovací teplota	2-8 °C



Obr. 15 Ukázka tvaru kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust ANP DGP 736465

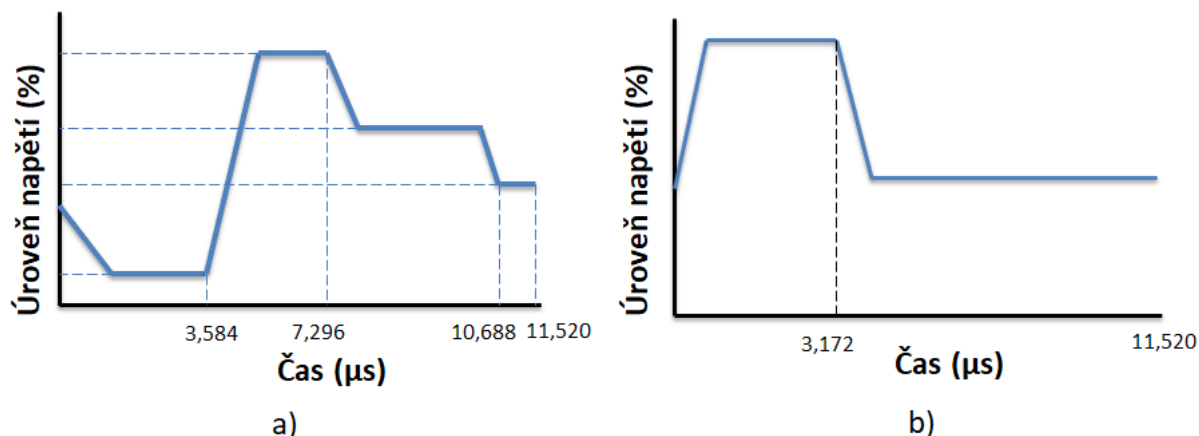
2.1.2 Nevodivé materiály

Materiál XP PriElex® SU-8 1.0 byl použit pro tisk dielektrických vrstev při výrobě kondenzátorů. Jde o transparentní, teplotně stabilní materiál s vysokou rezistivitou. Běžně se využívá jako fotorezist a má hlavní dvě výhody v nízkoteplotním vytvrzování (<150 °C) a vysoký obsah polymerních látek při zachování nízké viskozity. Vysoký obsah polymeru umožňuje tisk silnějších a uniformnějších vrstev. [24] Další parametry jsou shrnuty v Tab. 2. Materiál je vytvrzován jednak tepelně, ale také pomocí UV záření. Materiál je proto uchováván v temném prostředí za pokojové teploty. Při tisku a manipulaci s cartridge je nutné dbát na to, aby nebyl vystaven UV záření, mohlo by pak docházet k tvorbě pevných částic a tím ucpávání trysek. Na Obr. 16 je vidět použitý napěťový profil piezoelektrického aktuátoru při tisku. Na Obr. 17 jsou vidět kapky vylétávající z cartridge ve vybraných časech. Je zde patrný dlouhý ocásek a vysoká rychlost (přibližně 20 m/s) vylétávajících kapek. Nicméně při tisku dielektrických vrstev to nepředstavuje žádný problém, naopak dochází k rovnoměrnému pokrytí substrátu a nanesených vrstev bez nutnosti vykrývat mezery vzniklé při tisku více tryskami.

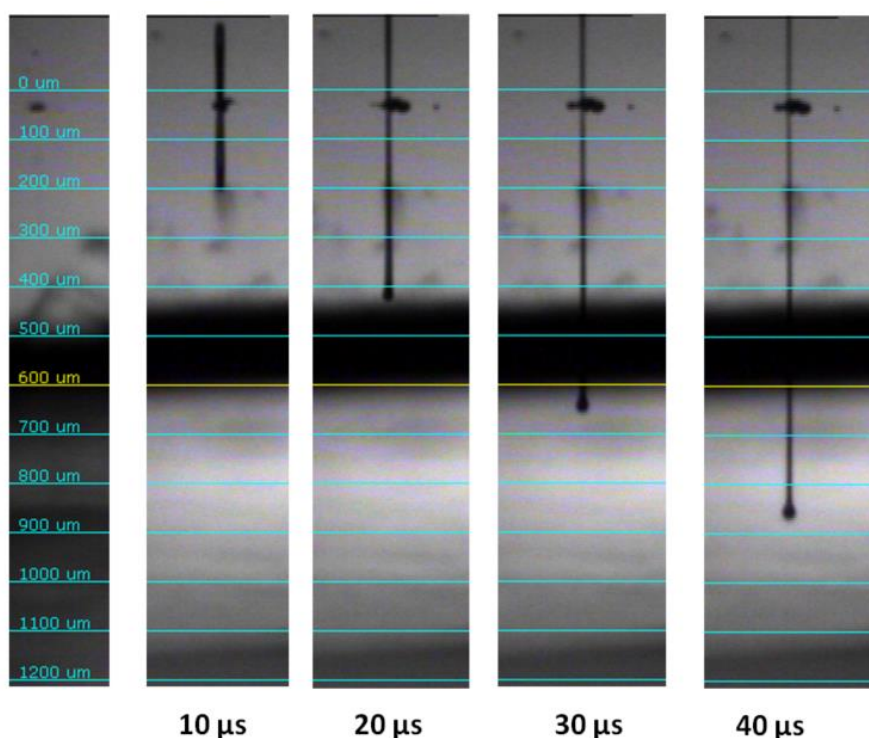
Povrchové napětí	30 Dyn/cm	Napětí na tryskách	17-20 V
Hustota	1.038 g/cm ³	Teplota cartridge	30 °C
Filtrace	0.2 μm	Teplota podložky	30 – 60 °C
Viskozita	9.33 cSt	Objem kapky	10 pL
Podíl pevných látek	32 %	Relativní permitivita	4

Tab. 2 Základní vlastnosti materiálu SU-8 [26]

Příprava kondenzátorů



Obr. 16 Napěťový profil inkoustu SU-8



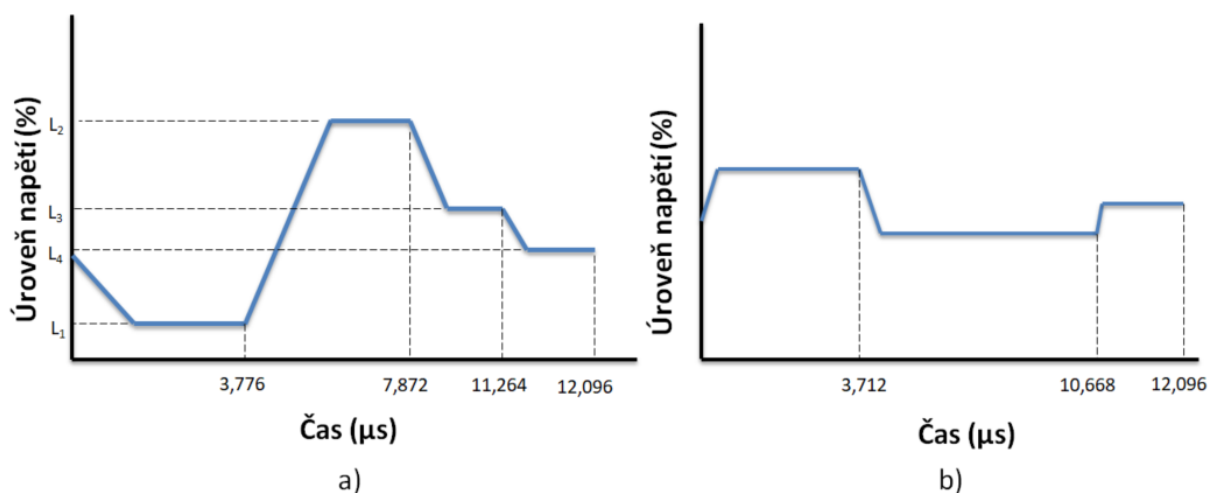
Obr. 17 Ukázka tvaru kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust SU-8

c-PVP

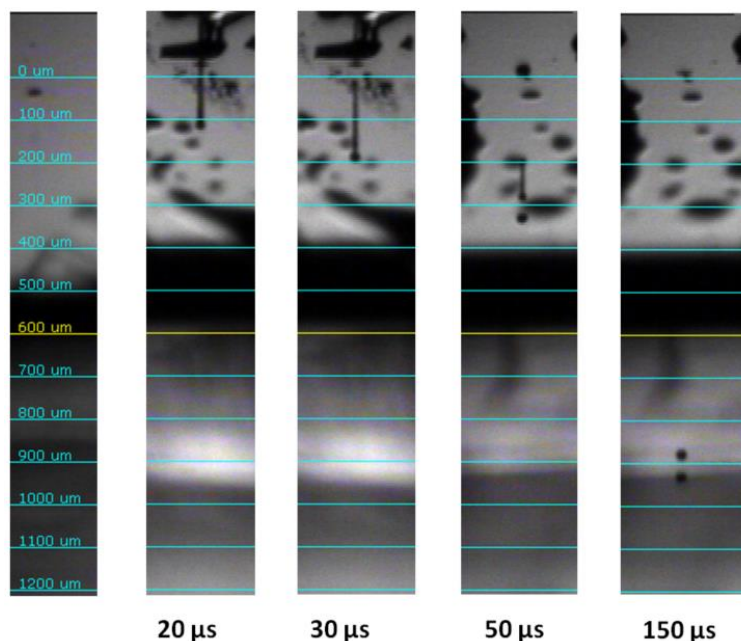
Druhým dielektrickým materiálem, který byl použit, byl c-PVP - Cross-linked poly-4-vinylphenol. Materiál je běžně využíván pro nanášení dielektrických vrstev polem řízených tranzistorů pomocí spin-coating technologie. PVP má větší viskozitu při menší hmotnostní koncentraci polymeru v rozpouštědle 1 - Hexanol. To umožňuje tisk tenčích vrstev oproti SU-8.[24] Tento materiál byl připraven přímo na katedře z koncentrátu PVP a je možno namíchat hned několik dávek. Relativní permitivita materiálu je 3,6. Materiál byl namíchan podle následujícího postupu:

Příprava kondenzátorů

(PVP) Poly-4-vinylphenol byl rozpuštěn v 10 ml PGMEA (propylene glycol monomethyl ether Acetate) a za pokojové teploty míchán pomocí magnetického míchání. Methylovaný Poly (melamine-co-formaldehyde) (PMFM, dostupný na Sigma Aldrich, Mn asi 432, 84 % hmotnosti v 1 -butanolu) byl přidán jako sezítovací činidlo a výsledný roztok byl míchán po dobu 12 hodin. Hmotnostní poměr PVP ku PMFM byl 5:1. Před tiskem byl roztok zředěn pomocí PGMEA v poměru 1:1 a filtrován pomocí 0,2 μm filtru k odstranění zbytkových nečistot.[27] Na Obr. 18 je vidět použitý napěťový profil piezoelektrického aktuátorů při tisku. Na Obr. 19 jsou vidět kapky vylétávající z cartridge ve vybraných časech.



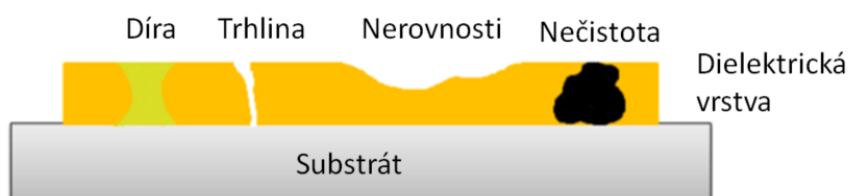
Obr. 18 Napěťový profil inkoustu c-PVP



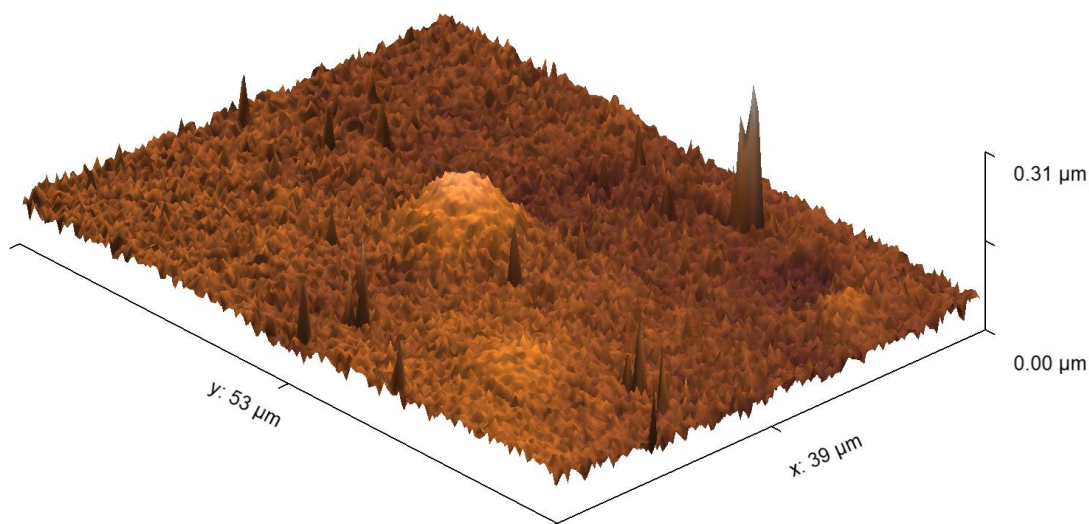
Obr. 19 Ukázka rychlosti kapek vylétávajících kapek v daných časech pro inkoust c-PVP

2.1.3 Vady při tisku dielektrika

Během tisku dielektrických materiálů je nezbytné věnovat pozornost několika faktorům, které mohou významně ovlivnit výsledek tisku. Na Obr. 20 je zobrazeno několik variant, které se mohou vyskytnout. Uniformita dielektrických vrstev je nezbytná zejména při tisku dalších vrstev. Sledování uniformity je důležité zejména při tisku tenkých vrstev, protože vznik vad je zde více pravděpodobný. Díry a trhliny v inkoustu mohou způsobovat protékání inkoustu nanášeného na dielektrický materiál a mohou tak způsobovat jeho zkratování napříč dielektrickým materiálem. Díry mohou vznikat kvůli vzduchu zachycenému do inkoustu během tisku, nebo kvůli špatnému smáčení, respektive pokrytí povrchu. Trhliny se mohou vytvářet během sušení nebo vytvrzování kvůli vysokým teplotám, nebo mechanickým poškozením díky vnějším silám. [28] Při použití dielektrického materiálu k pokrytí již nanesených vrstev může docházet také k nerovnostem povrchu naneseného materiálu například kvůli stékání inkoustu, nebo kopírování již nanesených vrstev. To pak může dále způsobovat stékání inkoustu nanášeného na dielektrický materiál a vzniku ostrůvků s přebytkem materiálu oproti místům s nedostatkem vodivého inkoustu. V neposlední řadě může docházet k zalití částíček prachu do dielektrického materiálu, který se na povrch dostal při manipulaci během žihání. Toto pak může způsobovat nehomogenitu materiálu, ovlivnění materiálových vlastností nebo některou ze zmíněných vad. Na Obr. 21 je vidět vzduchová bublina zachycená v materiálu SU-8. Velikost bubliny je přibližně 10 – 13 μm . Snímek byl pořízen pomocí AFM mikroskopu.



Obr. 20 Příklady možných vad při tisku dielektrických vrstev



Obr. 21 Snímek bubliny zachycené v dielektrickém materiálu SU-8 pořízený pomocí AFM

2.1.4 Substrát

Jako substrát pro všechny struktury byla použita PET folie Mitsubishi Novele™ IJ-220. Jedná se o průhledný flexibilní materiál vhodný pro nízko teplotní přípravu tištěných motivů. Fólie mají povrchovou úpravu, která umožňuje bezproblémový tisk vodivých i nevodivých inkoustů a není třeba jej před tiskem jakkoliv upravovat nebo dodatečně čistit. Materiál je dodáván ve formě jednotlivých listů o rozměru 21,6 x 27,9 cm nebo jako role. Školní laboratoř disponuje oběma variantami, nicméně pro tisk byla využita pouze první varianta. V Tab. 3 jsou shrnuty základní vlastnosti materiálu.

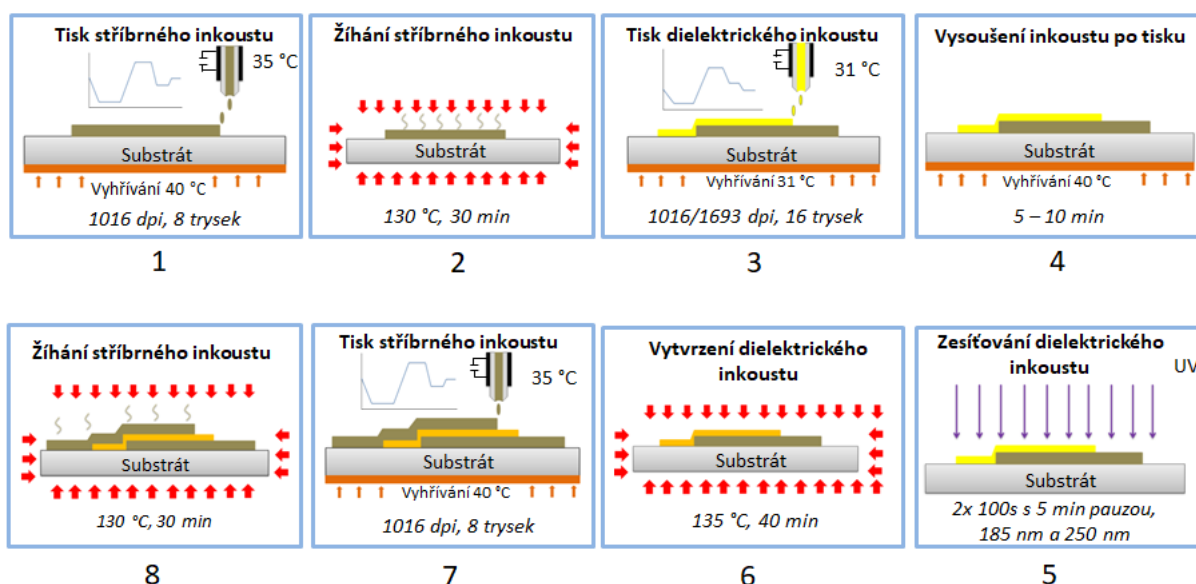
Gramáž	175±10 g/m ²
Tloušťka	140±12 μm
Objemová vodivost	<22 %
Hladkost	>1000 Sec.

Tab. 3 Základní vlastnosti PET folie [29]

2.2 TISK KONDENZÁTORŮ

2.2.1 Postup přípravy

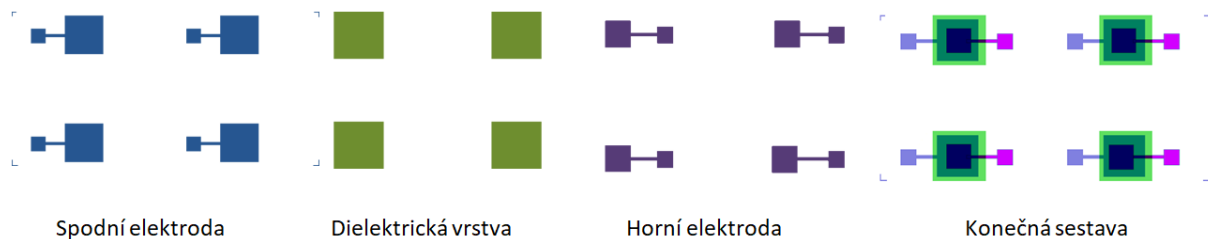
Na Obr. 22 je vyobrazen graficky postup přípravy tištěných vrstev vodivým a dielektrickým inkoustem. Postup ukazuje přípravu deskového kondenzátoru, kdy je nutné nanést postupně 3 vrstvy různými inkousty. Detailně je postup popsán v následující kapitole. V případě interdigitálních kondenzátorů postup končí krokem vytvrzení dielektrického inkoustu, poslední dva kroky již nejsou prováděny.



Obr. 22 Postup přípravy vrstvených motivů pomocí vodivých dielektrických inkoustů

2.2.2 Deskový kondenzátor

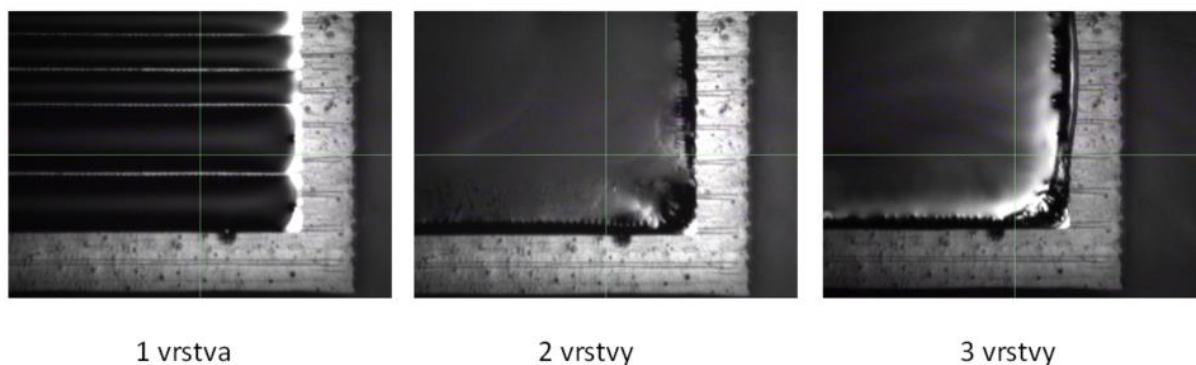
Motivy tištěných kondenzátorů jsou vidět na Obr. 23. Motivy byly navrhovány pomocí programu CleWin5, který umožňuje návrhy různých tvarů a velikostí, dále pak jednoduchý export, při kterém je možné si volit rozlišení exportovaného motivu. První tisknutá vrstva je spodní vodivá elektroda tištěná pomocí inkoustu s částicemi stříbra. Druhá vrstva je dielektrická, tištěná pomocí materiálu SU-8. Třetí a poslední vrstva je horní vodivá elektroda, tištěná opět inkoustem s částicemi stříbra. Motiv dále obsahuje sesazovací značky. Ty jsou důležité pro správné umístění jednotlivých vrstev, především pak pro co nejlepší vycentrování vodivých elektrod. Pro dosažení kvalitního kapacitoru je nutná nízká povrchová nerovnost a vysoká uniformita každé vrstvy. Dále je nutné eliminovat díry v dielektriku a chybějící nebo řidce natištěné linky jednotlivých inkoustů. Proto byly vzory dielektrické vrstvy navrženy větší než spodní elektroda, aby bylo zajištěno, že nanosená vrstva je kompaktní a bez mezer ještě před tím, než překryje spodní elektrodu. Dalším důvodem je předcházení vzniku zkratu v případě, kdy by byla plocha dielektrické vrstvy stejná jako spodní elektrody a nepodařilo se provést korektní sesazení.



Obr. 23 Motivy jednotlivých vrstev deskového kondenzátoru

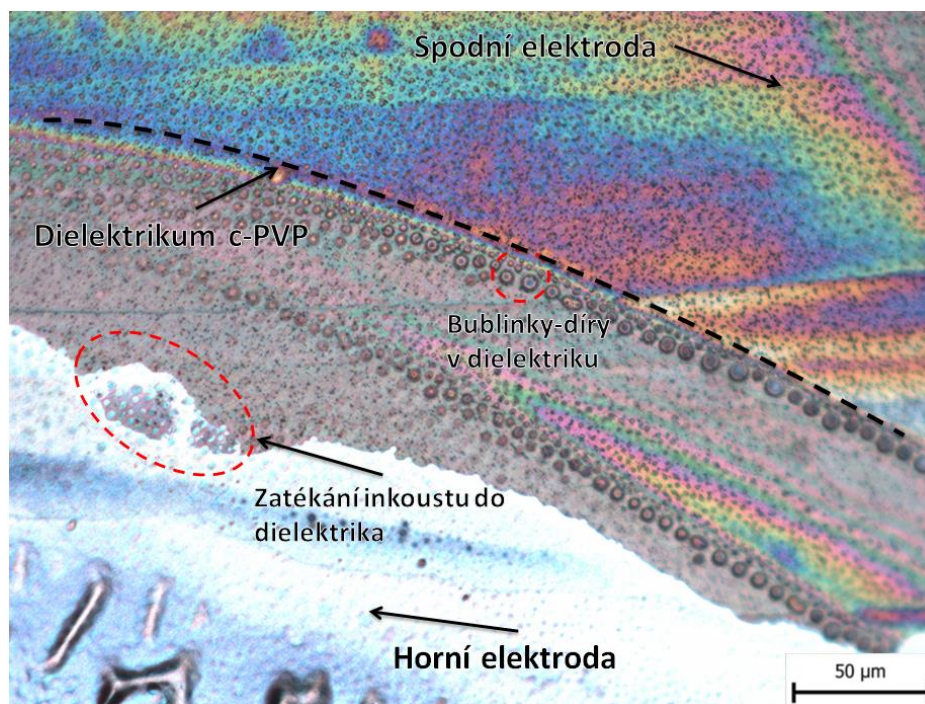
Spodní elektroda byla natištěna na PET folii s rozestupem kapek 25 μm , což odpovídá rozlišení 1016 dpi, při teplotě substrátu 40 $^{\circ}\text{C}$ za použití 6 až 8 trysek. Z důvodů použití více trysek vznikají mezi jednotlivými přejezdy tiskové hlavy mezery, které bylo nutno překrýt. Toto bylo vyřešeno posuvem počátečního bodu tisku vždy mezi jednotlivými vrstvami o několik desítek μm . Celkový počet vrstev spodní elektrody byl vždy 3. Po natištění všech vrstev spodní elektrody je nutné inkoust dát na 30 min a 130 $^{\circ}\text{C}$ do sušárny na vytvrzení. K tomu byla využita sušárna Memmert UF30Plus. Teplota byla volena s ohledem na možnosti inkoustu i substrátu. Při zvolení vyšší teploty je vodivost inkoustu a celé natištěné vrstvy větší, nicméně při teplotě 150 $^{\circ}\text{C}$ již dochází ke žloutnutí PET folie. Dalším krokem pak bylo natištění dielektrické vrstvy materiálem SU-8. Tisk byl proveden 16 tryskami za teploty substrátu a cartridge 31 $^{\circ}\text{C}$. Za této teploty nedochází k tak rychlému vysychání inkoustu, který tak má více času se rozlévat a spojit. Netvoří se proto mezery mezi jednotlivými přejezdy tiskové hlavy, a proto nebylo nutné provádět posouvání počátečního bodu. Počet dielektrických vrstev se pohyboval od 2 do 10 při hodnotách rozlišení 1016 dpi a 1693 dpi. S větším počtem dielektrických vrstev však klesala hodnota výsledné kapacity kondenzátoru, což vyplývá z rovnice pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru. Následoval opět proces vytvrzování. U tohoto materiálu je nutné provést svázání pomocí UV záření. Jednotlivé vzorky tak byly nejprve vkládány do UV ozone cleaneru, kde byly vystaveny UV záření po dobu 2x 100 sekund. Expozice trvala vždy 100 sekund, mezi kterými byla nechána vždy 5 minutová pauza. Poté byly vloženy do sušárny a vytvrzovány 40 min při 135 $^{\circ}\text{C}$. Nakonec byla natištěna horní elektroda vodivým inkoustem. Parametry tisku a vytvrzování byly zachovány identicky s těmi z první vrstvy. Na Obr. 24 je zachycen tisk horní elektrody kamerou tiskárny.

Příprava kondenzátorů



Obr. 24 Tisk horní elektrody na dielektrický materiál SU-8

Jak bylo zmíněno, dielektrická vrstva u deskových kondenzátorů byla provedena materiálem SU-8, kterým bylo dosaženo dobrých výsledků z hlediska kvality tisku. Materiálem c-PVP bylo natištěno několik prvních pokusných vzorků, kde se projeví dříve popsané vady, konkrétně bublinky, kvůli kterým docházelo ke zkratování horní a spodní elektrody. Detail této vady je vidět na Obr. 25, který byl pořízen pomocí digitálního mikroskopu Olympus BX 60. Zde si také lze všimnout zatékání inkoustu do dielektrického materiálu. Bylo vtištěno několik vzorků s různými parametry rozlišení tisku a počtu vrstev, nicméně i přes vynaložené úsilí nakonec nebylo možné použít tento dielektrický materiál pro výrobu deskových kondenzátorů.



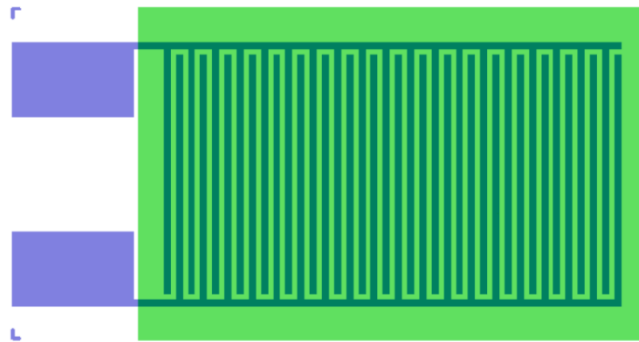
Obr. 25 Detail povrchu natištěného materiálu c-PVP z mikroskopu s patrnými bublinkami v dielektrické vrstvě

2.2.3 Interdigitální kondenzátor

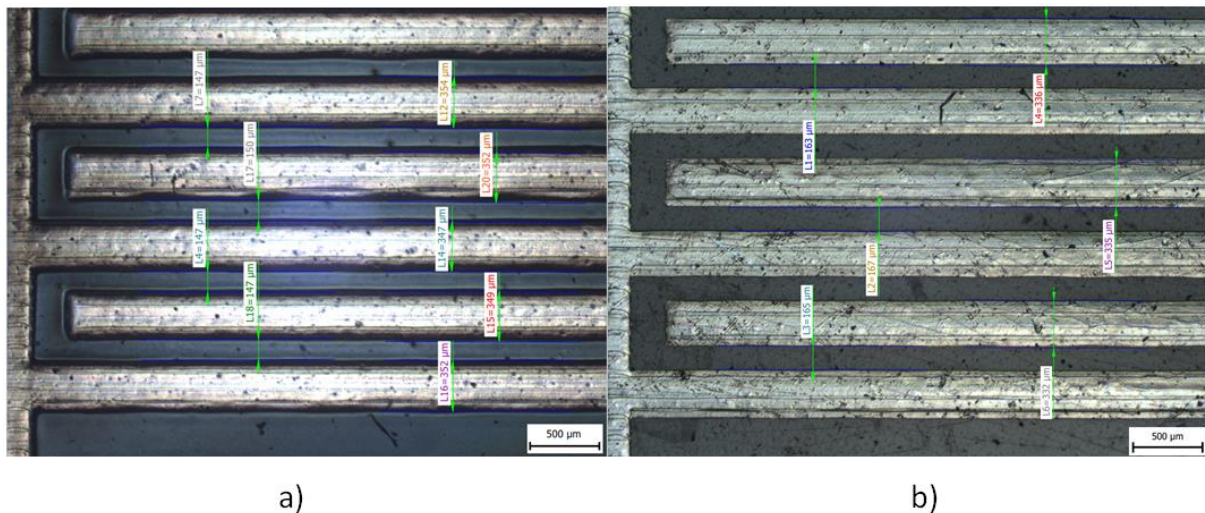
Příprava interdigitálních kondenzátorů je oproti deskovým jednodušší, vyžaduje totiž tisk pouze dvou vrstev různých materiálů. Nejprve jsou natištěny vodivé elektrody. Protože leží v jedné vrstvě, jsou tisknuty zároveň a jsou odděleny pouze vzduchovou mezerou, respektive prostorovým umístěním na substrátu, jak je vidět na Obr. 26. Spodní elektroda byla tištěná opět ve třech vrstvách. Po nanesení

Příprava kondenzátorů

všech vrstev byl substrát s natištěným motivem přesunut do sušárny k následnému žihání. To probíhalo za teploty 130 °C po dobu 30 min. Po vytvrzení stříbrného inkoustu byl přes meandrovou část kondenzátoru nanesen dielektrický materiál. Počet vrstev se lišil dle jednotlivých vzorků od 1 do 3. Poté následoval opět proces vytvrzení. Vzorky byly dány do sušárny, kde byly vzorky ponechány při teplotě 135 °C po dobu 40 min. Na Obr. 27 je pak příklad interdigitálního kondenzátoru, fotka byla pořízena pomocí optického mikroskopu.



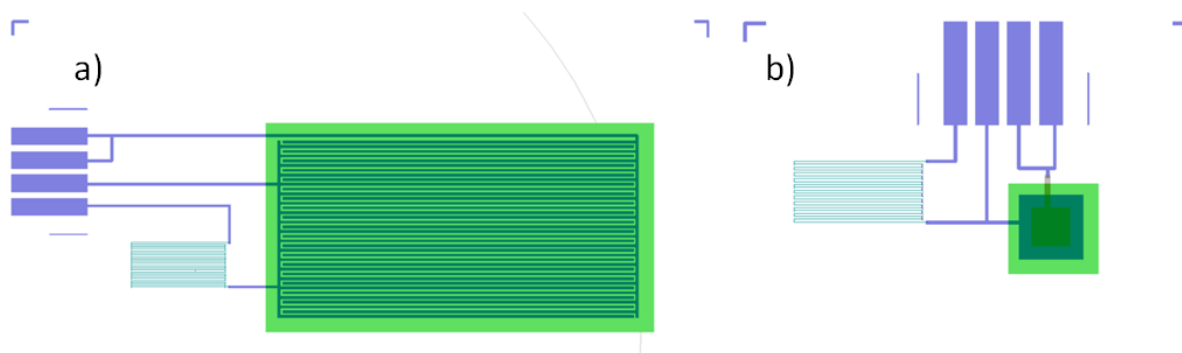
Obr. 26 Motiv interdigitálního kondenzátoru



Obr. 27 Detail natištěného motivu interdigitálního kondenzátoru. Na obrázku a) je přes vodivý inkoust nanasena ještě vrstva dielektrického materiálu SU-8, na obrázku b) je pouze vrstva stříbrného inkoustu

2.2.4 RC článek

Jako aplikace tištěných kondenzátorů byl vybrán RC článek. Ten byl postupně natištěn jak s interdigitálním, tak s deskovým kondenzátorem. Při návrhu již bylo počítáno s následující charakterizací. Byl proto připraven motiv s ploškami, které se zasadily do konektoru. To velmi usnadňuje následnou manipulaci i měření a nedochází k poškození vzorku. Motivy tištěných RC článků jsou vidět na Obr. 28.



Obr. 28 Motiv RC článků s a) interdigitálním a b) deskovým kondenzátorem

2.3 VYTVRZOVÁNÍ INKOUSTŮ

2.3.1 Metody žíhání

2.3.1.1 Sušárna

Nejjednodušší možností žíhání vzorků je sušárnou, kdy se dovnitř umístí vzorky, které jsou pak zahřívány na zvolenou teplotu po určitý čas. Zahřívání je tak substrát i inkoust rovnoměrně ze všech stran. Tento způsob žíhání je vhodný pro většinu inkoustů i substrátů. Omezení klade pouze maximální teplota daného substrátu nebo inkoustu, kdy ještě nedochází k jeho poškození.

2.3.1.2 Horká plotýnka

Jedná se o kontaktní způsob žíhání, kdy je teplo předáváno do substrátu přes styčnou plochu s plotýnkou, která je nahřátá na námi zvolenou teplotu. Substrát dále rozvádí a předává teplo až do inkoustu, kde tak dochází k jeho žíhání. Ne všechny substráty je však možné tímto způsobem zahřívát. Například u folií může velmi brzy docházet k ohybu, čímž může dojít nejen k trvalému poškození folie a tím znemožnění dalšího tisku, ale také ke zmenšení styčné plochy a některé části natištěného motivu nemusí být dostatečně prohřáté. Pokud však tyto problémy nenastanou, jde o velmi intenzivní a rychlý způsob vysoušení a žíhání.

2.3.1.3 Blesk

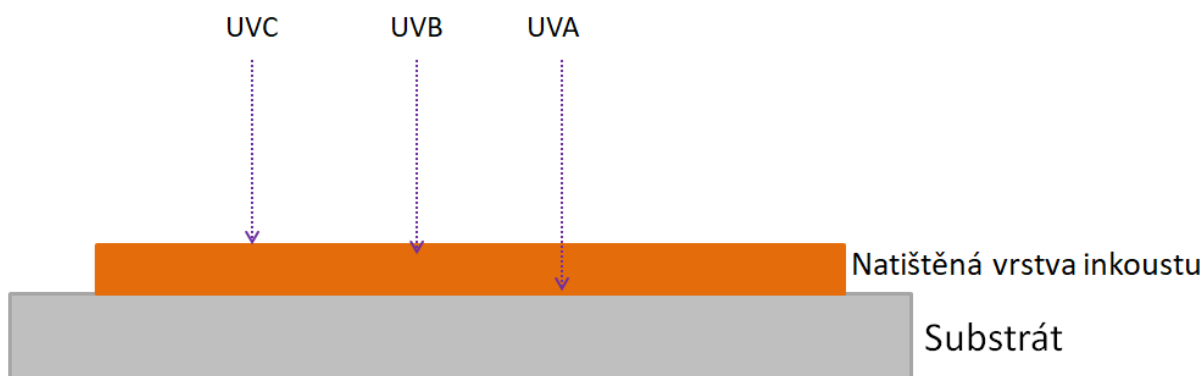
Jedná se asi o nejšetnější a nejrychlejší možnost žíhání materiálů. Tato metoda, vhodná nejčastěji pro Roll-to-Roll tisk nebo pro kontinuální pásový tisk, je také označovaná jako „Intense pulse light (IPL) sintering“, nebo „photonic sintering“. Vzorky s natištěnými strukturami jsou vloženy pod zdroj světla o velmi vysoké intenzitě a jsou pulzně osvětlována xenonovou výbojkou po dobu jednotek až desítek mikrosekund. Krátkodobě se tak inkoust zahřeje na velmi vysokou teplotu a je žíhán, zatímco substrát nedokáže na takové pulsy reagovat. Nedochází tak k jeho namáhání vysokými teplotami a jeho degradaci. Celý proces tak v závislosti na velikosti natištěných struktur může trvat jen několik sekund.

2.3.2 Metody vytvrzování

Zejména dielektrické materiály je kromě tepelného žíhání nutné vytvrdit také pomocí UV záření. Konkrétním zástupcem takových materiálů jsou například SU-8 nebo SunTronic dielektrický materiál. Vytvrzování pomocí UV záření je proces, během kterého dojde pomocí UV záření k fotochemické

Příprava kondenzátorů

reakci v materiálu, díky které dojde k tvorbě zesíťovaného polymerního materiálu. Materiál tak získá mechanicky odolné vlastnosti a díky změně struktury dojde například i ke změně relativní permitivity materiálu, což může mít kladný vliv na následné vlastnosti natištěných struktur. Před použitím zdroje UV záření je však nutné brát v úvahu vyzařované spektrum daného zdroje. Spektrum UV záření je děleno do 3 kategorií: UVA, UVB, a UVC, jak je vidět na Obr. 29. Zde je také vidět, že každý druh záření má jinou hloubku vniku. UVC a UVB mají hloubku vniku jen 1-2 μm nebo i méně. UVA má o hodně větší hloubku vniku, asi 5-100 μm . To může ovlivnit výsledek zesíťování materiálu. Pokud by například výrazně převažovalo záření UVC, došlo by pouze k vytvoření pevné tenké vrstvy na povrchu materiálu, ale pod ní by ke změnám v materiálu vůbec nedošlo. Nejideálnější je tak použití takového zdroje, který disponuje zářením se všemi typy v dostatečné intenzitě, aby došlo k zesíťování v celém profilu nanesené vrstvy. V tabulce jsou pak vidět energetické hodnoty pro jednotlivé typy záření. [30]



Obr. 29 Hloubka vniku UV záření u vrstev tištěného inkoustu, upraveno z [30]

Tab. 4 Druhy UV záření s jednotlivými hodnotami vlnové délky, energie a hloubky vniku

Kategorie UV záření	Vlnová délka (nm)	Energie (kJ/mol)	Hloubka vniku (μm)
UVA	400-315	299-380	<1-2
UVB	315-280	380-428	<1-2
UVC	280-100	428-1197	5-100

2.3.2.1 UV osvitová jednotka

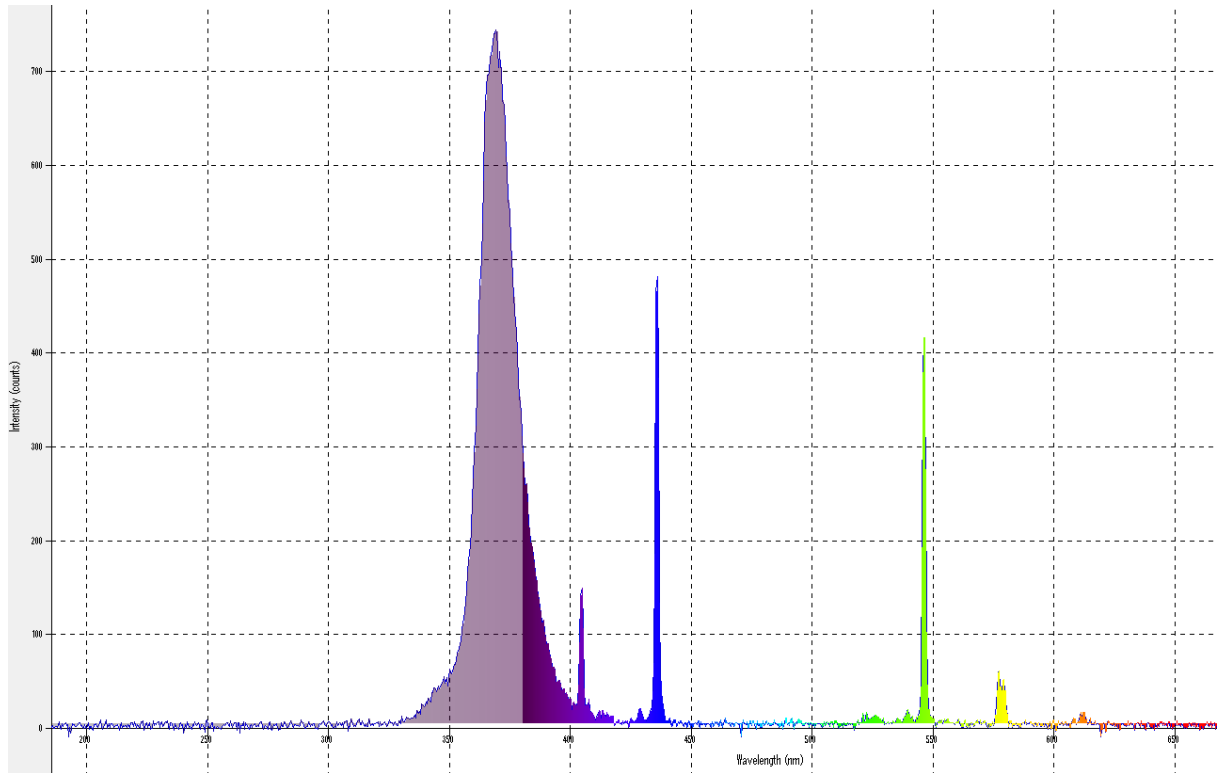
Jedná se o zařízení, které je osazeno zdrojem UV záření. Jako například zařízení, kterým disponuje laboratoř na katedře mikroelektroniky proMA vakuum UV exposure box 2. Na Obr. 30 je vidět spektrum zářivek Philips TL-D Actinic BL 15W. Maximum intenzity je vidět okolo 370 nm. Pomocí tohoto zařízení lze osvětit plochu přibližně velikosti A4 s výškou do 8 cm. Takto lze osvětit materiály, které se dají UV zářením vytvrdit, jako například některé inkousty nebo polymery. Nevýhodou tohoto zařízení je nízká intenzita záření, proto je vhodná spíše k použití materiálů citlivých na UV záření.

2.3.2.2 UV ozone cleaner

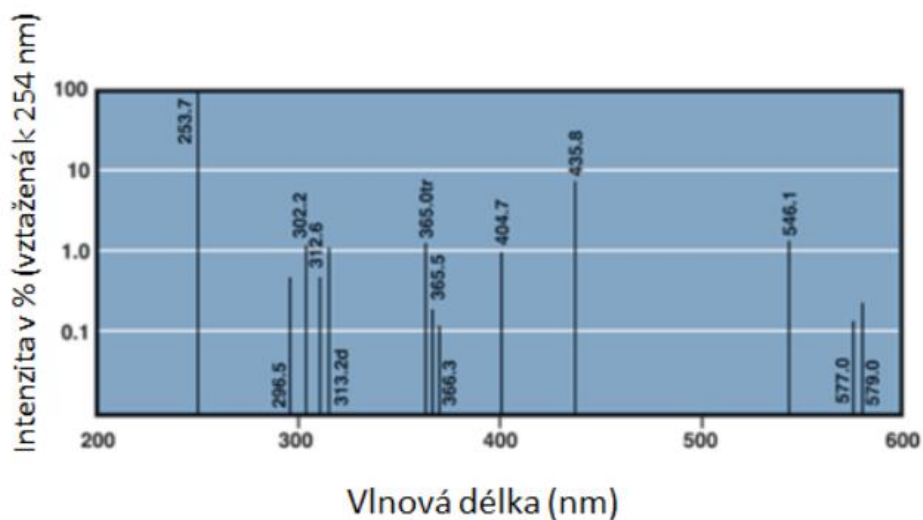
UV ozone cleaner je primárně využíván k čištění a úpravě povrchu substrátů pomocí UV záření. UV ozone cleaner, který je dostupný v laboratoři katedry Mikroelektroniky, je osazeno syntetickou Quartz UV lampou, schopnou generovat všechny druhy UV záření s dominantními vlnovými délkami 185 a 254 nm. Intenzita záření je 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ve vzdálenosti 100 cm. Toto zařízení se také úspěšně

Příprava kondenzátorů

využívá k vytvrzování tenkých vrstev a to právě díky velké intenzitě záření. Vzhledem vlnovým délkám dochází také ke generování ozónu, který působí na povrch materiálu a upravuje jeho smáčivost. Při používání jednotky tak musí být zajištěno odvádění vznikajícího ozónu, což bylo v našem případě zajištěno umístěním do flow boxu. Spektrum UV ozone cleaneru je vidět na Obr. 31.



Obr. 30 Spektrum osvitové jednotky



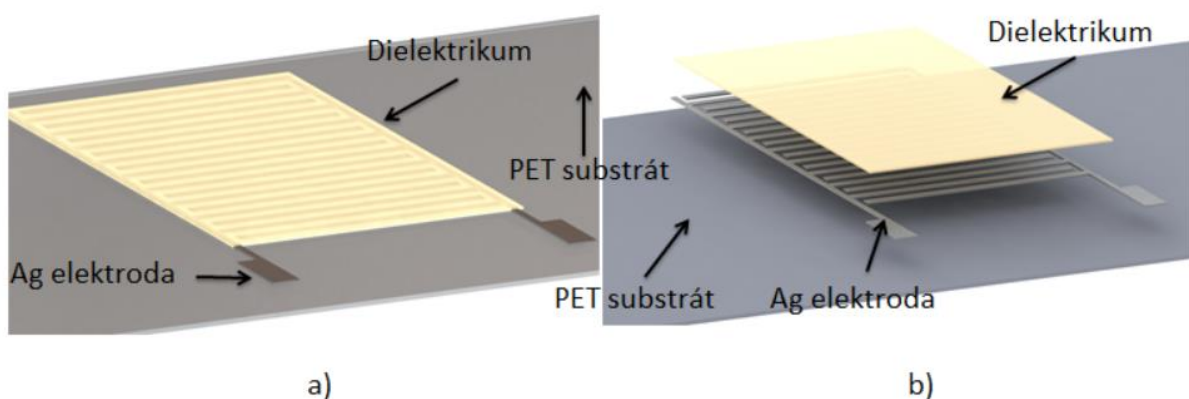
Obr. 31 Spektrum UV ozone cleaneru [31]

3 Charakterizace natisknutých vzorků

3.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Charakterizace kondenzátorů probíhala na zařízení Hameg LCR HM 8118, jde o kombinované zařízení schopné měřit mimo jiné kapacitu, odpor, indukčnost a další parametry. Při měření bylo využíváno rozmezí frekvencí od 100 Hz do 100 kHz, kdy při každé změně frekvence bylo zařízení vždy kalibrováno.

3.1.1 Inter-digitální kondenzátory



Obr. 32 3D zobrazení interdigitálního kondenzátoru a, ve složeném a b) rozloženém tvaru

Sada 1

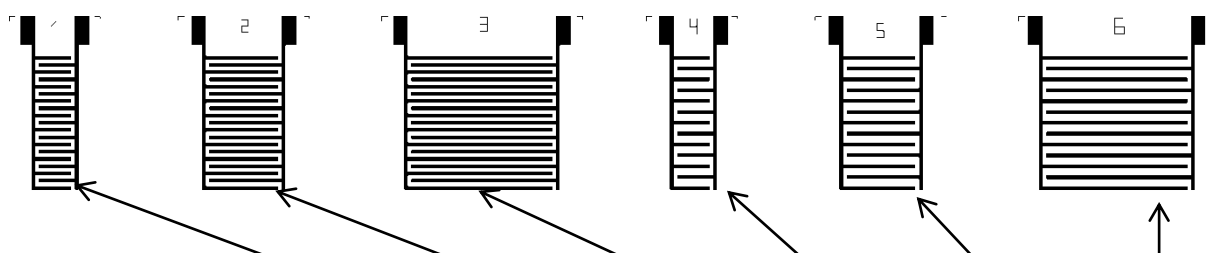
Dielektrikum vzduch

Technologický postup:

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min

Na Obr. 33 je vidět motiv první sady interdigitálních kondenzátorů, které byly vytištěny, na Obr. 32 je pak vidět 3D zobrazení. Detailní rozměry následují v Tab. 5.

Obr. 33 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 se vzduchovým dielektrikem



Vzorek #	1	2	3	4	5	6
Délka prstu (mm)	5	10	20	5	10	20
Šířka prstu (mm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Šířka mezery (mm)	0,5	0,5	0,5	1	1	1
Výška (mm)	20	20	20	20	20	20

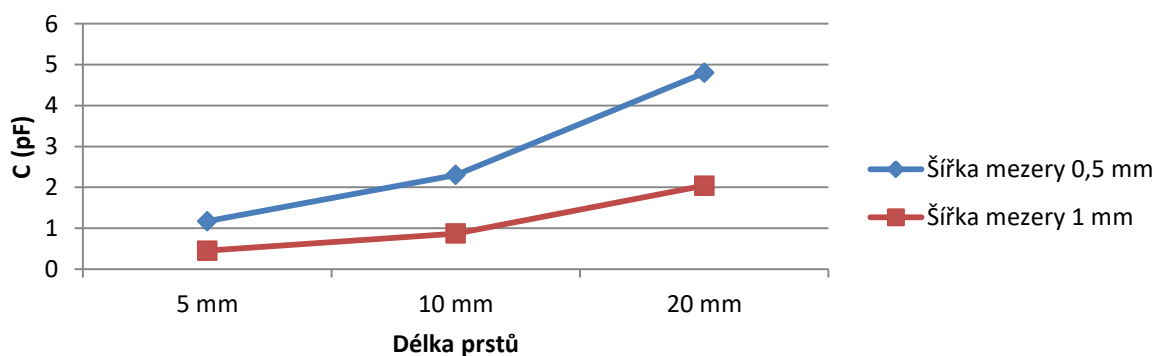
Tab. 5 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů

Pro každý vzorek bylo natištěno nejméně 5 kusů, Tab. 6 pak ukazuje průměrné hodnoty z těchto pěti kusů se vzduchovým dielektrikem. Hodnoty byly následně zpracovány a vyneseny do grafu. Obr. 34 ukazuje hodnoty kapacity pro frekvenci 1 kHz.

Tab. 6 Tabulka průměrných naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
0.1 kHz	2,17	3,53	6,22	1,55	2,07	3,26
1 kHz	1,17	2,3	4,8	0,45	0,87	2,04
10 kHz	1,4	2,65	5,33	0,58	1,12	2,43
100 kHz	2,47	3,28	4,82	1,76	2,24	3,32

Kapacita interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem



Obr. 34 Kapacita interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz

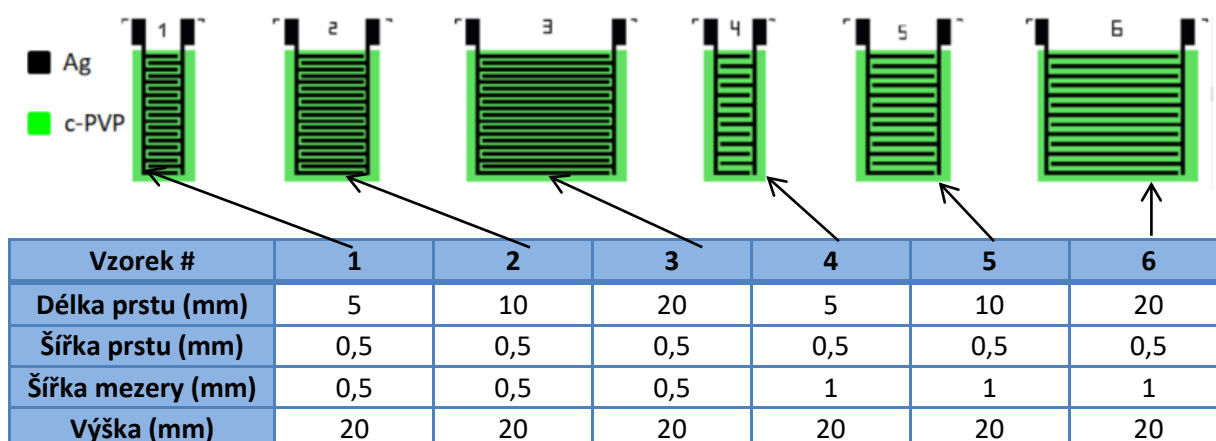
Dielektrikum c-PVP

Technologický postup

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk c-PVP dielektrického materiálu, 1 až 3 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min

Obr. 35 ukazuje motiv kondenzátorů ze sady 1. Z té byly vybrány vzorky 2 a 5, které byly pokryty dielektrickým materiálem c-PVP v jedné až třech vrstvách. Detailní rozměry jednotlivých kondenzátorů jsou shrnuty v Tab. 7.

Obr. 35 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 s dielektrikem SU-8

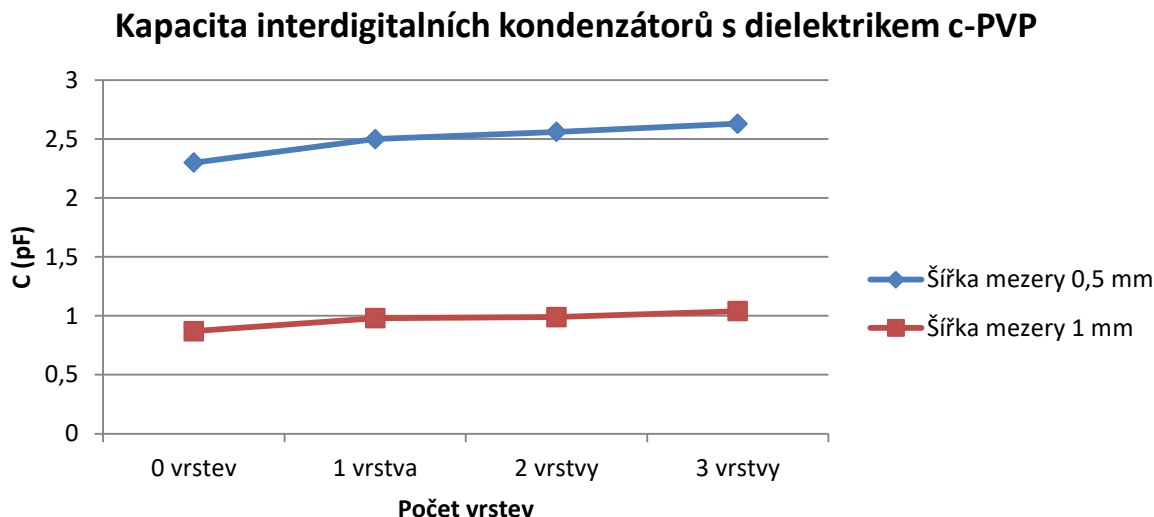


Tab. 7 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů

Pro každý vzorek bylo natištěno nejméně 5 kusů, Tab. 8 pak ukazuje průměrné hodnoty z těchto pěti kusů s dielektrickým materiálem c-PVP. Je zde patrná frekvenční závislost, kdy u vzorku 5 pro všechny možnosti počtu vrstev je patrný propad hodnoty kolem frekvence 1 kHz, z důvodů chování blížího se stejnosměrnému napětí. Na Obr. 36 je pak vidět závislost velikosti kapacity na počtu vrstev c-PVP. První hodnota v grafu (0 vrstev) odpovídá vzduchovému dielektriku. Číselné hodnoty jsou pak vidět v Tab. 9. Ta obsahuje hodnoty kapacity pro frekvenci 1 kHz.

Tab. 8 Tabulka průměrných naměřených hodnot pro vzorky 2 a 5 s různým počtem vrstev dielektrika c-PVP

Počet vrstev dielektrika	Vzorek 2 1 vrstva	Vzorek 2 2 vrstvy	Vzorek 2 3 vrstvy	Vzorek 5 1 vrstva	Vzorek 5 2 vrstvy	Vzorek 5 3 vrstvy
	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)
0.1 kHz	3,67	3,68	3,74	2,14	2,11	2,14
1 kHz	2,5	2,56	2,63	0,98	0,99	1,04
10 kHz	2,83	2,92	2,98	1,43	1,41	1,43
100 kHz	3,51	3,46	3,43	2,39	2,31	2,23



Obr. 36 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz

Tab. 9 Tabulka závislosti kapacity na počtu vrstev dielektrika c-PVP pro interdigitální kondenzátor s šířkou prstu i mezery 0,5 a 1 mm a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz

c-PVP	0 vrstev	1 vrstva	2 vrstvy	3 vrstvy
Šířka mezery	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
0,5 mm	2,3	2,5	2,56	2,63
1 mm	0,87	0,98	0,99	1,04

Dielektrikum SU-8

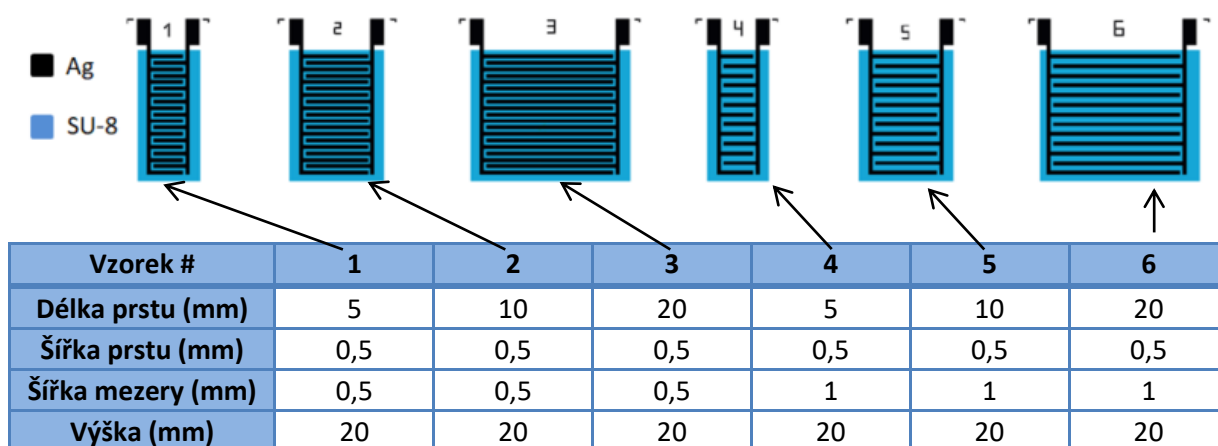
Technologický postup

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk SU-8 dielektrického materiálu, 1 až 3 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min

Obr. 37 ukazuje motiv kondenzátorů ze sady 1. Z té byly vybrány vzorky 2 a 5, které byly pokryty dielektrickým materiálem SU-8 v jedné až třech vrstvách. Detailní rozměry jednotlivých kondenzátorů jsou shrnuty v Tab. 10.

Charakterizace natisknutých vzorků

Obr. 37 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 1 s dielektrikem SU-8



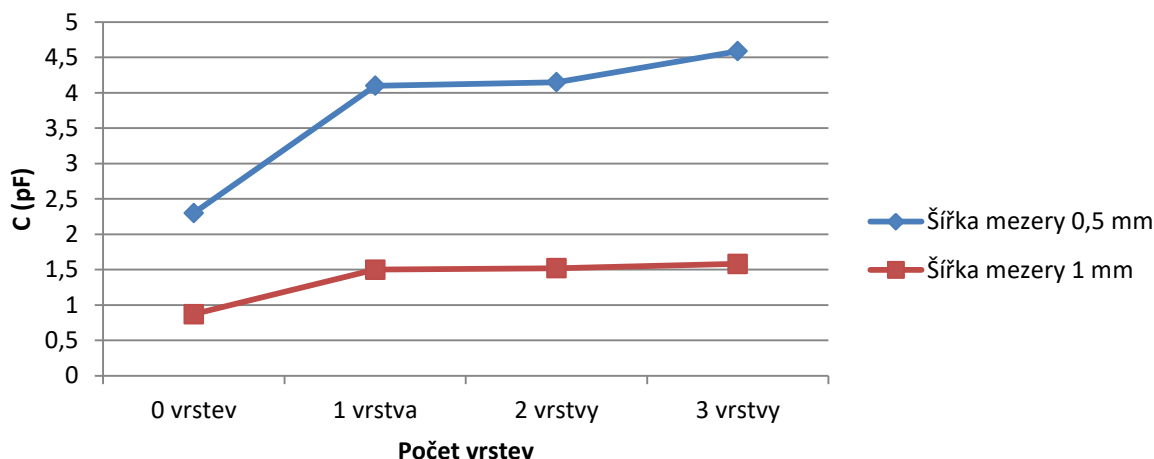
Tab. 10 Tabulka s rozměry první sady interdigitálních kondenzátorů

Pro každý vzorek bylo natištěno nejméně 5 kusů, Tab. 11 pak ukazuje průměrné hodnoty z těchto pěti kusů s dielektrickým materiálem SU-8 podle počtu vrstev dielektrika. Obr. 38 pak ukazuje závislost velikosti kapacity na počtu vrstev SU-8. První hodnota v grafu (0 vrstev) odpovídá vzduchovému dielektriku. Číselné hodnoty jsou pak vidět v Tab. 12. Ta obsahuje hodnoty kapacity pro frekvenci 1 kHz.

Tab. 11 Tabulka naměřených hodnot pro vzorky 2 a 5 s různým počtem vrstev dielektrika SU-8

Počet vrstev dielektrika	Vzorek 2 1 vrstva	Vzorek 2 2 vrstvy	Vzorek 2 3 vrstvy	Vzorek 5 1 vrstva	Vzorek 5 2 vrstvy	Vzorek 5 3 vrstvy
	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)	C (pf)
100 Hz	4,65	4,67	4,55	2,19	2,2	2,23
1kHz	4,1	4,15	4,59	1,5	1,52	1,58
10KHz	4,9	4,99	5	1,8	1,85	1,78
100kHz	4,8	5,1	4,6	2	2,1	2,19

Kapacita interdigitalních kondenzátorů s dielektrikem SU-8



Obr. 38 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8, šířkou prstů 0,5 mm pro různé šířky mezery a délkou prstů 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz

Tab. 12 Tabulka závislosti kapacity na počtu vrstev dielektrika SU-8 pro interdigitální kondenzátor s šířkou prstu 0,5 mm a šířkou mezery 0,5 a 1 mm a délkou prstu 10 mm pro hodnotu frekvence 1 kHz

SU-8	0 vrstev	1 vrstva	2 vrstvy	3 vrstvy
Šířka mezery	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
0,5 mm	2,3	4,1	4,15	4,59
1 mm	0,87	1,5	1,52	1,58

Sada 2

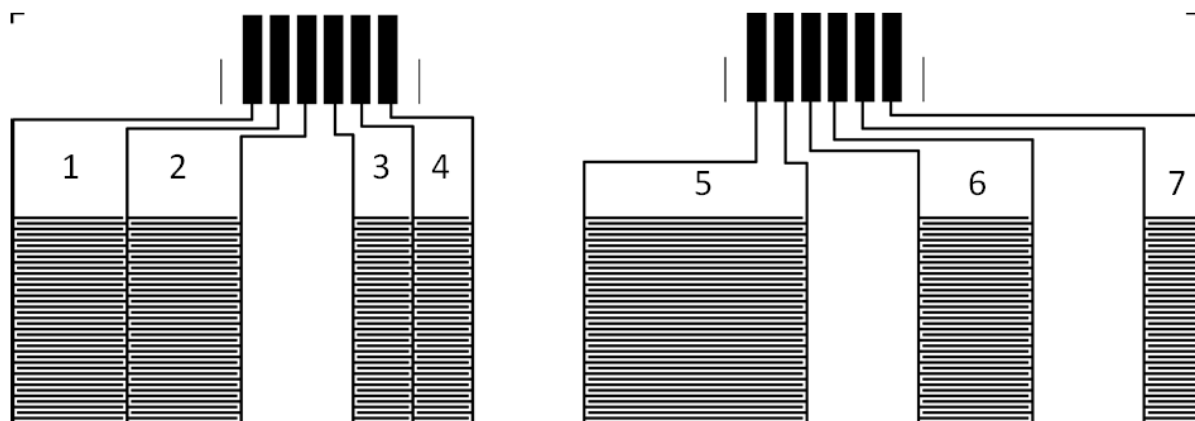
Dielektrikum vzduch

Technologický postup:

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min

Dále byla natištěna sada interdigitálních kondenzátorů s šířkou prstu i mezery 250 μm . Pro snadnější měření byl motiv opatřen ploškami pro připojení do konektoru. Motiv tištěných kondenzátorů je k vidění na Obr. 39, Tab. 13 pak obsahuje detailní popis rozměrů jednotlivých kondenzátorů.

Charakterizace natisknutých vzorků



Obr. 39 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 se vzduchovým dielektrikem

Tab. 13 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů

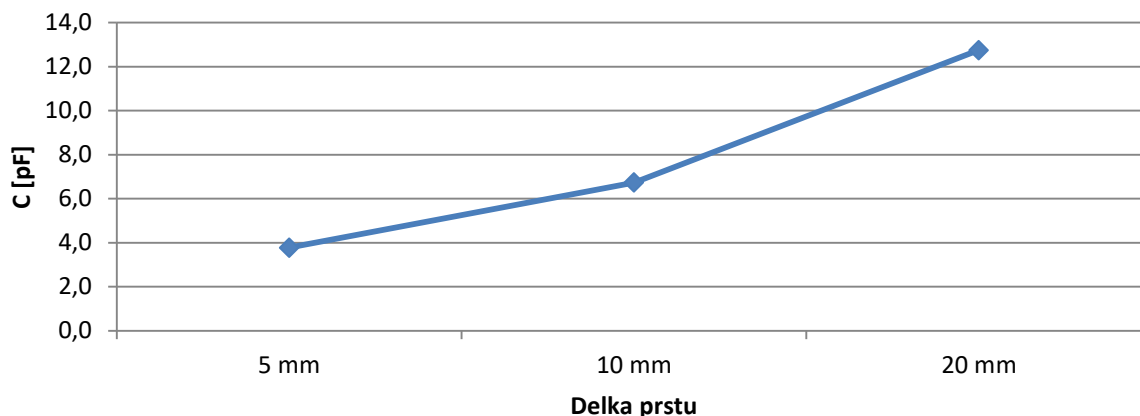
Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
Délka prstu (mm)	10	10	5	5	20	10	5
Šířka prstu (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Šířka mezery (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Výška (mm)	20	20	20	20	20	20	20

Pro každý typ kondenzátoru z druhé sady bylo opět natištěno 5 kusů. V Tab. 14 jsou pak průměrné hodnoty kapacity těchto pěti kusů pro danou frekvenci a vzorek se vzduchovým dielektrikem. Na Obr. 40 je znázorněna závislost kapacity na délce prstů. Zobrazené hodnoty odpovídají naměřeným hodnotám při frekvenci 1 kHz.

Tab. 14 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	Vzorek 7
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	6,8	6,8	3,67	3,43	13,29	7,27	5,74
1kHz	6,85	6,4	3,7	3,78	12,8	6,94	3,84
10 kHz	6,71	6,28	3,54	3,57	11,82	6,38	3,75
100 kHz	5,85	5,71	4,33	4,38	5,57	5,81	4,58

Kapacita interdigitálních kapacitorů se vzduchovým dielektrikem



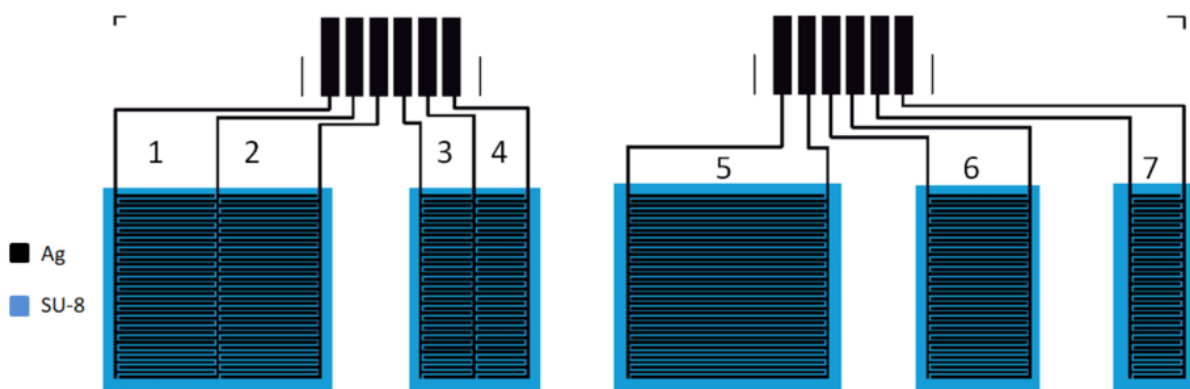
Obr. 40 Závislost kapacity na délce prstu interdigitálních kondenzátorů se vzduchovým dielektrikem pro hodnotu frekvence 1 kHz

Dielektrikum SU-8

Technologický postup

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk SU-8 dielektrického materiálu, 1 až 3 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min

Na Obr. 41 je vidět motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2, který je navíc opatřen dielektrickou vrstvou materiálu SU-8, kterým byly následně pokryty všechny vzorky. Detailní rozměry jsou pak vidět v Tab. 15.



Obr. 41 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem SU-8

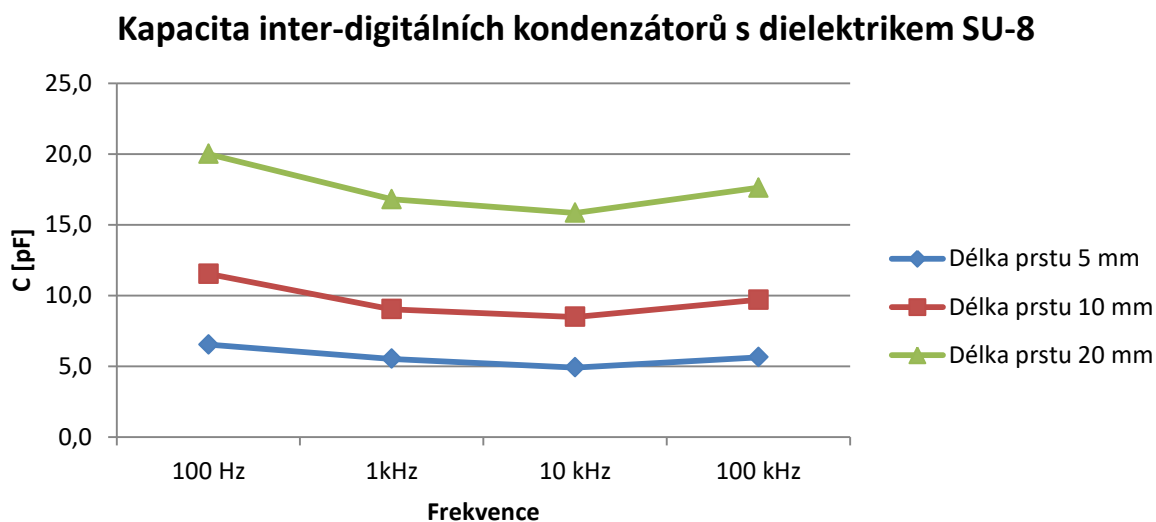
Tab. 15 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů

Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
Délka prstu (mm)	10	10	5	5	20	10	5
Šířka prstu (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Šířka mezery (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Výška (mm)	20	20	20	20	20	20	20

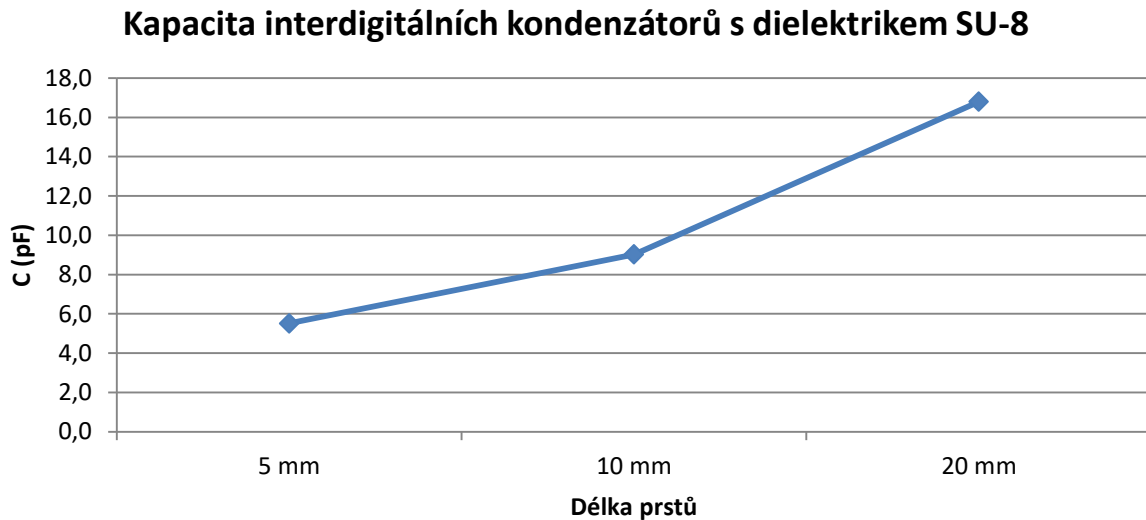
Pro každý typ kondenzátoru bylo natištěno 5 kusů. V Tab. 16 jsou pak průměrné hodnoty kapacity pro danou frekvenci a vzorek s dielektrikem SU-8 těchto pěti kusů. Hodnoty jsou pak vyneseny do grafu, Obr. 42. Obr. 43 ukazuje závislost kapacity na délce prstů.

Tab. 16 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8

Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	8,94	9,74	5,31	4,74	20	15,9	9,54
1kHz	9,11	8,47	5,17	5,27	16,8	9,5	6,1
10 kHz	8,76	8,31	4,93	4,87	15,84	8,38	4,92
100 kHz	10,19	9,45	5,72	5,68	17,62	9,43	5,48



Obr. 42 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 pro různé délky prstů



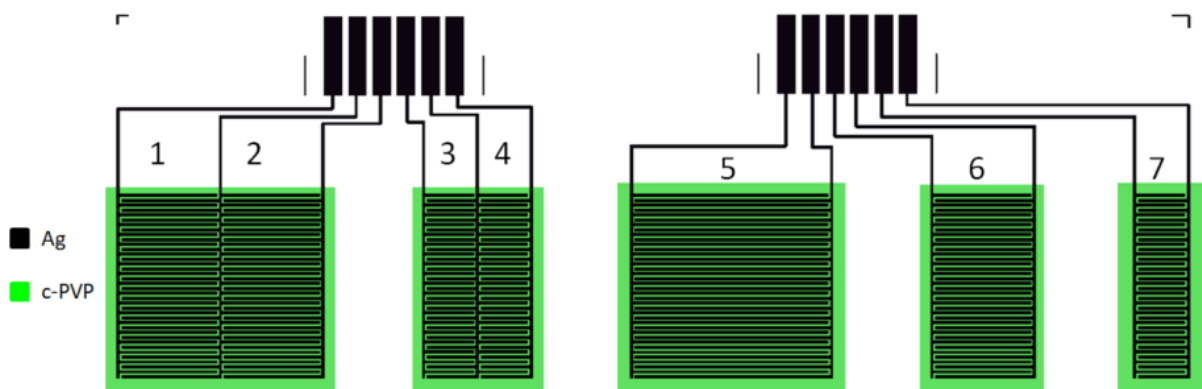
Obr. 43 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz

Dielektrikum c-PVP

Technologický postup

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk c-PVP dielektrického materiálu, 1 až 3 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min

Na Obr. 44 je vidět motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2, který je navíc opatřen dielektrickou vrstvou materiálu c-PVP, kterým byly následně pokryty všechny vzorky. Detailní rozměry jsou pak vidět v Tab. 17.



Obr. 44 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem c-PVP

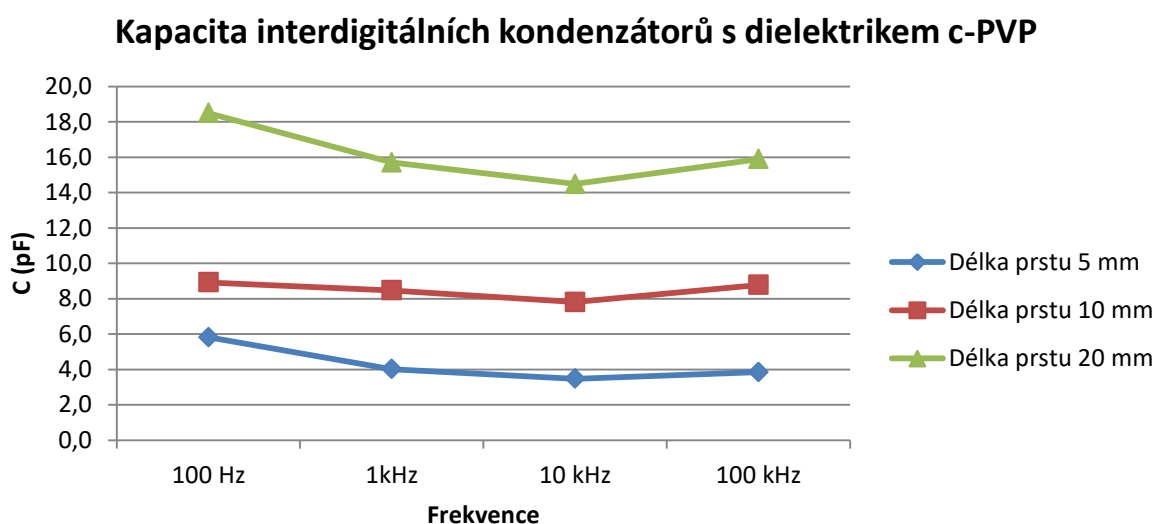
Tab. 17 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů

Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
Délka prstu (mm)	10	10	5	5	20	10	5
Šířka prstu (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Šířka mezery (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Výška (mm)	20	20	20	20	20	20	20

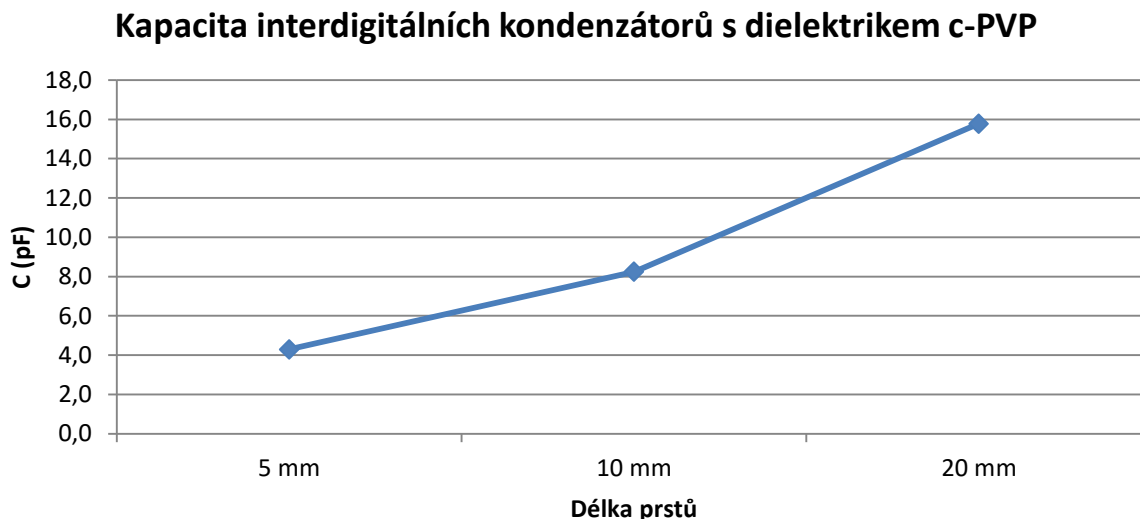
Tab. 18 Tabulka naměřených hodnot interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP

Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	6,43	5,95	5,12	3,62	18,5	14,4	8,7
1 kHz	8,37	8,23	4,82	4,74	15,7	8,8	2,5
10 kHz	8,18	7,53	4,67	4,58	14,49	7,71	1,17
100 kHz	8,86	8,89	4,98	5,22	15,89	8,57	1,33

Pro každý typ kondenzátoru bylo natištěno 5 kusů. V Tab. 18 jsou pak průměrné hodnoty kapacity pro danou frekvenci a vzorek s dielektrikem c-PVP těchto pěti kusů. Hodnoty jsou pak vyneseny do grafu, Obr. 45. Obr. 46 ukazuje závislost kapacity na délce prstů.



Obr. 45 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP pro různé délky prstů



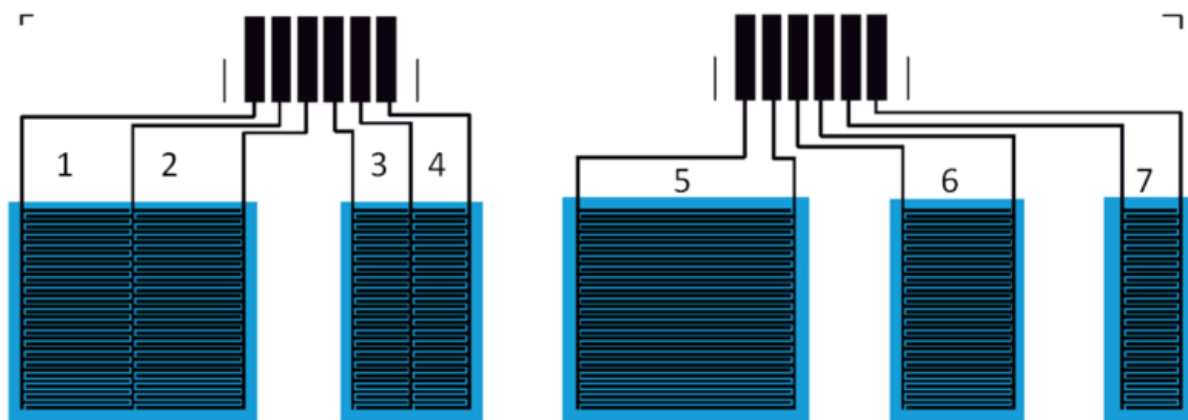
Obr. 46 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem c-PVP pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz

Dielektrikum c-PVP, SU-8 a vzduch

Technologický postup

- 1) Tisk Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk c-PVP / SU-8 dielektrického materiálu, 1 až 3 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min

Na Obr. 47 je vidět motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2, který je navíc opatřen vrstvou dielektrického materiálu, kterým byly následně pokryty 2 sady vzorků, jedna zůstala bez pokrytí dielektrikem. Detailní rozměry jsou pak vidět v Tab. 19.

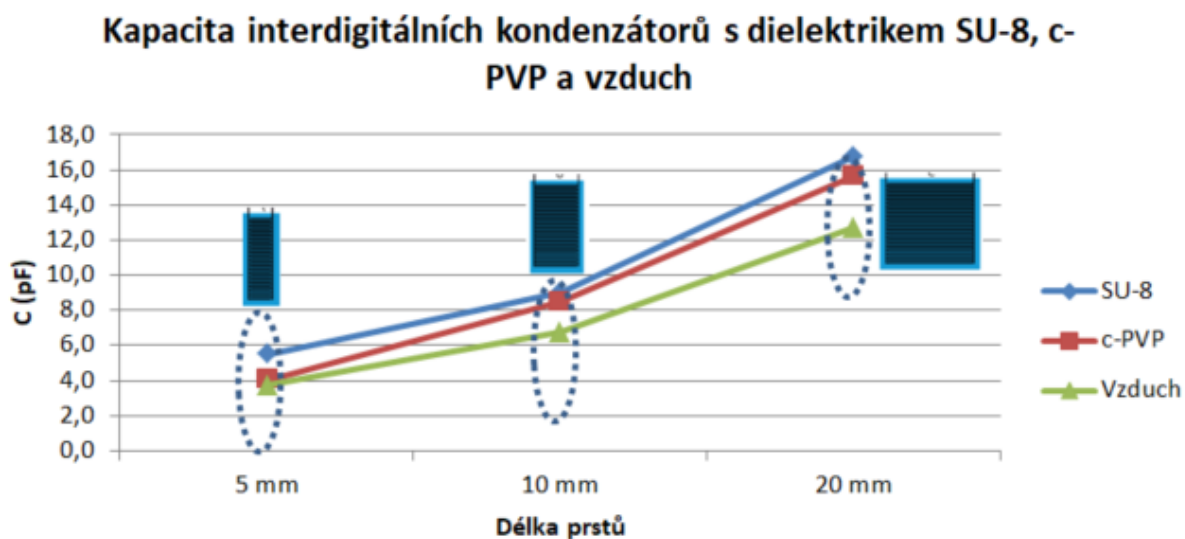


Obr. 47 Motiv interdigitálních kondenzátorů sady 2 s dielektrikem SU-8 a c-PVP

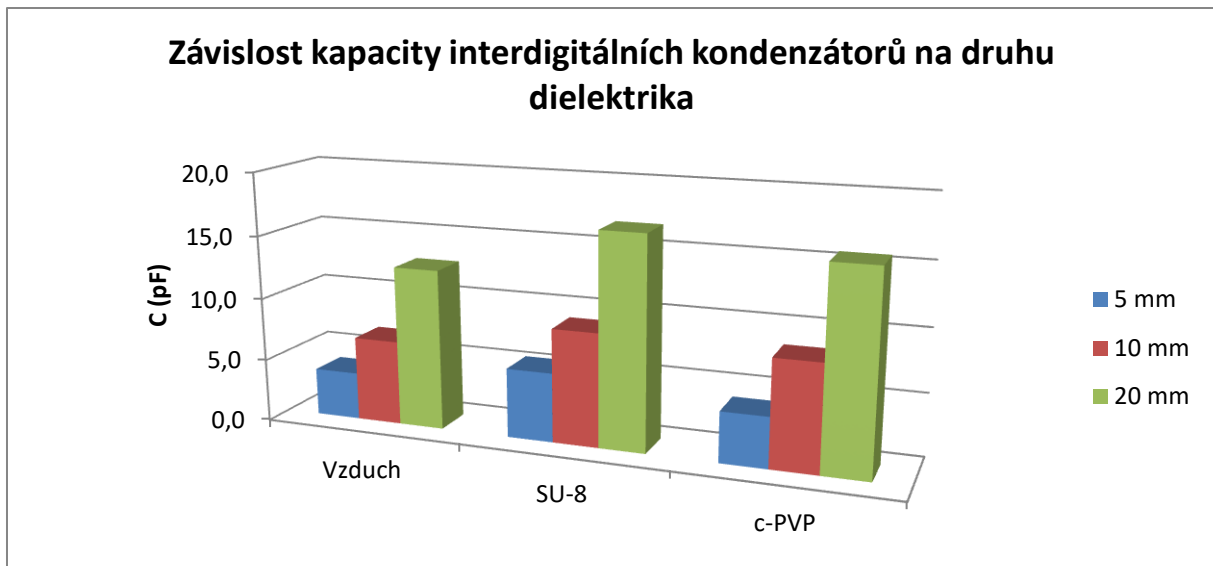
Tab. 19 Tabulka s rozměry druhé sady interdigitálních kondenzátorů

Vzorek #	1	2	3	4	5	6	7
Délka prstu (mm)	10	10	5	5	20	10	5
Šířka prstu (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Šířka mezery (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Výška (mm)	20	20	20	20	20	20	20

V závislosti na předchozích měření byly hodnoty pro jednotlivá dielektrika dále zpracovány do samostatných grafů. Obr. 48 vyjadřuje závislost kapacity na délce prstů pro jednotlivá dielektrika a Obr. 49 ukazuje velikost kapacity v závislosti na druhu dielektrika pro jednotlivé délky prstů.



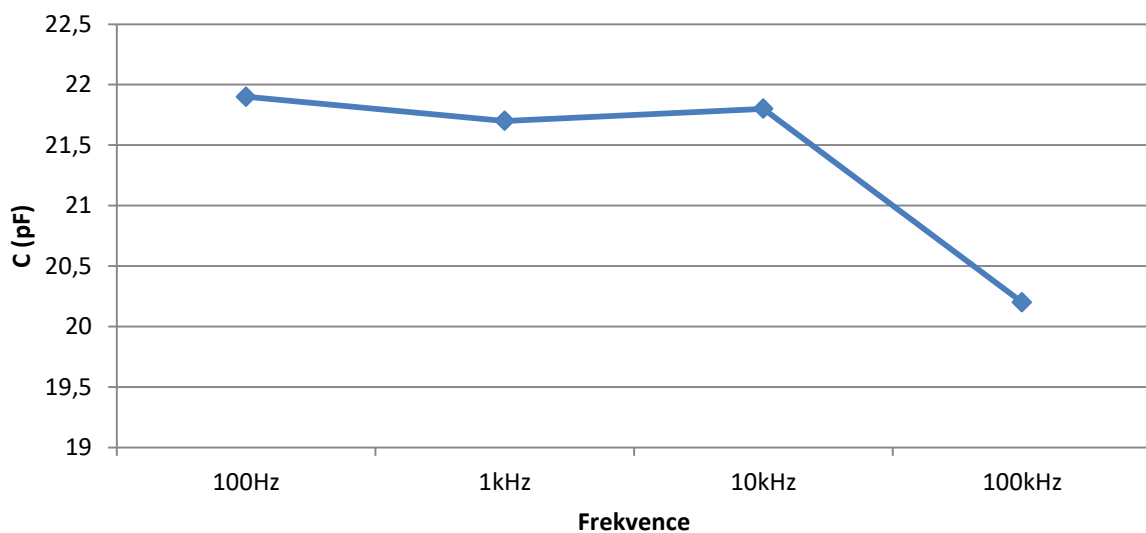
Obr. 48 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8, c-PVP a vzduch pro různé délky prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz



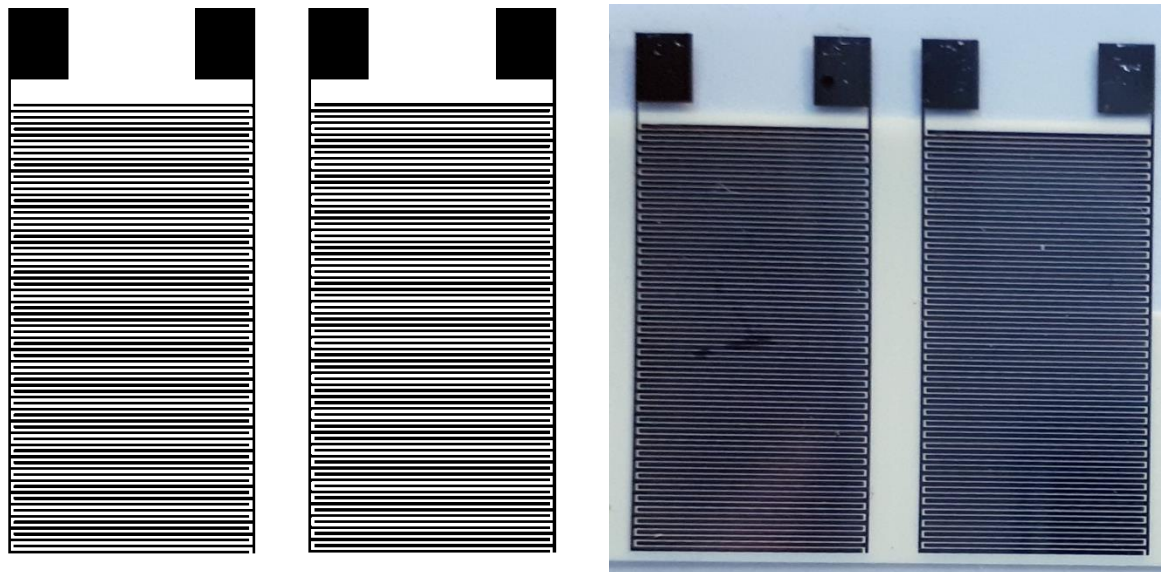
Obr. 49 Kapacita interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem vzduch, SU-8, c-PVP a různou délkou prstů pro hodnotu frekvence 1 kHz

Sada 3

Dále byly vytištěny vzorky, kde byla pozměněna šířka prstu i mezery na 125 μm . Byla zachována výška kondenzátoru jako u předešlých vzorků a to 20 mm. Jako dielektrický materiál byl použit SU-8. V tomto případě byla naměřena kapacita průměrně 21,4 pF. Motiv je zobrazen na Obr. 51, výsledky měření jsou vidět na Obr. 50.



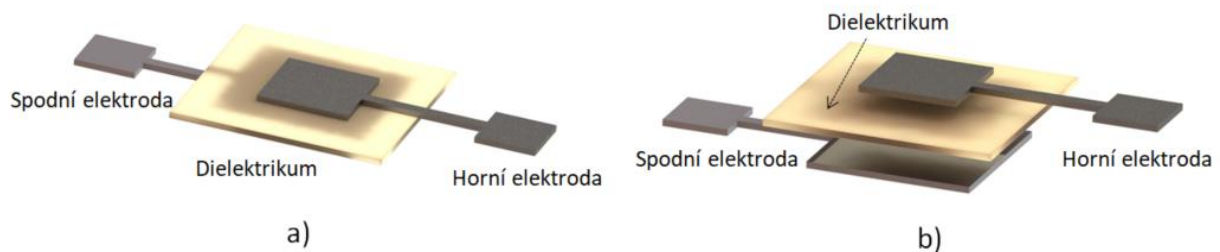
Obr. 50 Závislost kapacity na frekvenci interdigitálních kondenzátorů s dielektrikem SU-8 a šířkou prstu a mezery 0,125 mm



Obr. 51 Motif a foto interdigitálních kondenzátorů s šířkou mezery a prstu 0,125 mm

3.1.2 Deskové kondenzátory

V případě deskových kondenzátorů byly tištěny vzorky s plochou elektrod od 9 do 36 mm². Na Obr. 52 je vidět 3D vyobrazení deskového kondenzátoru jak ve složeném tvaru, který odpovídá reálnému vzorku, tak v rozloženém tvaru. Tab. 20 pak shrnuje průměrné hodnoty kapacity pro jednotlivé plochy elektrod. Obr. 53 ukazuje motiv jednotlivých vrstev deskového kondenzátoru, které byly postupně tištěny.

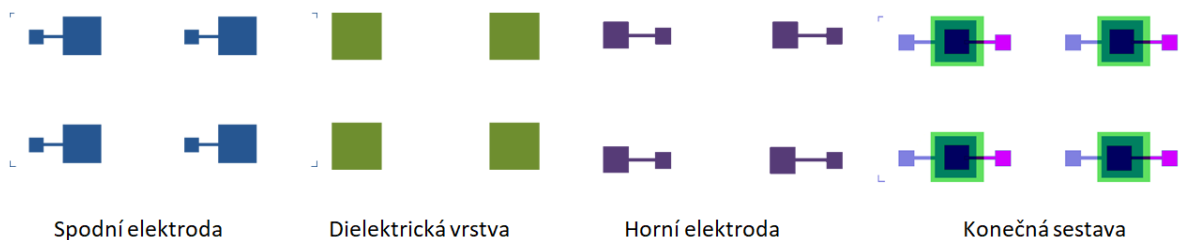


Obr. 52 3D zobrazení deskového kondenzátoru a) v reálném složeném tvaru b) v rozloženém – exploded tvaru

Technologický postup

- 1) Tisk spodní Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk SU-8 dielektrického materiálu, 1 až 10 vrstev, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 a 1693 dpi
- 4) Zesíťování materiálu pomocí UV záření
- 5) Žihání v sušárně při 135 °C po dobu 40 min
- 6) Tisk horní Ag elektrody, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 7) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min

Charakterizace natisknutých vzorků



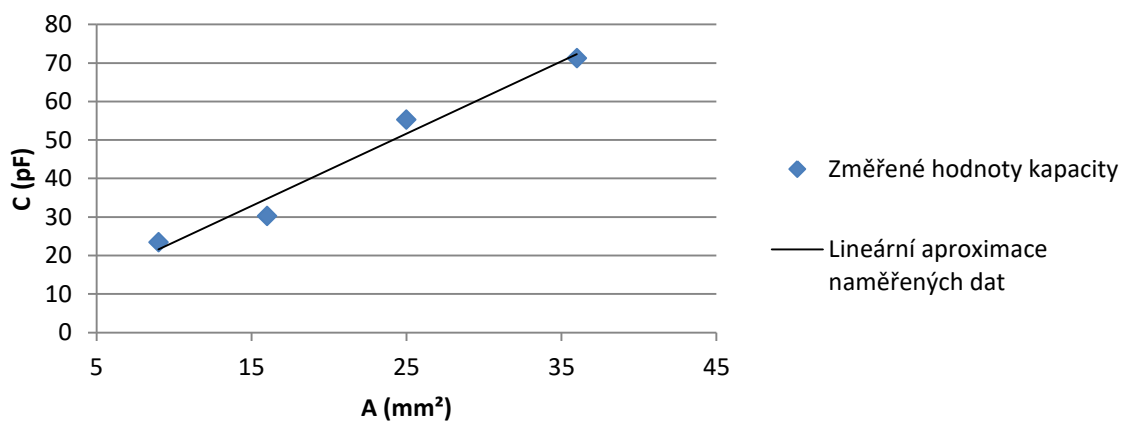
Obr. 53 Motiv jednotlivých vrstev deskových kondenzátorů a konečné sestavy

Tab. 20 Tabulka naměřených hodnot kapacity deskových kondenzátorů s různou plochou elektrod pro hodnotu frekvence 1 kHz

Plocha elektrod v mm ²	C (pF)
9	23,42
16	30,26
25	55,27
36	71,27

Obr. 54 ukazuje, jaký vliv má změna plochy elektrod na hodnotu kapacity. Z grafu je patrná téměř lineární závislost, kdy se zvětšující se plochou roste i hodnota kapacity.

Závislost kapacity deskových kondenzátorů na ploše elektrod



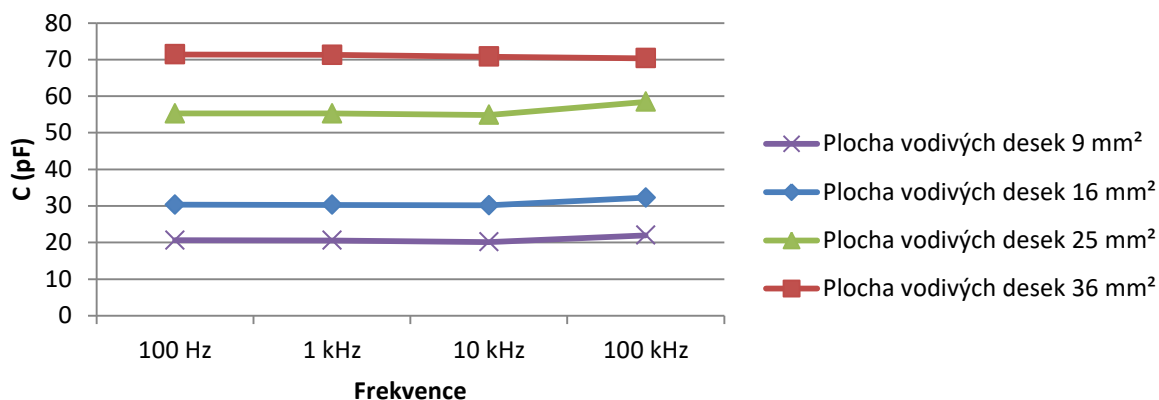
Obr. 54 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na ploše elektrod s lineárním proložením

Tab. 21 obsahuje průměrné hodnoty kapacity jednotlivých vzorků pro každou velikost plochy elektrod pro všechny měřené frekvence. Hodnoty jsou následně vyneseny do grafu, viz Obr. 55.

Tab. 21 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na frekvenci pro různé plochy elektrod

Plocha elektrod	9 mm ²	16 mm ²	25 mm ²	36 mm ²
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	23,60	30,33	55,28	71,40
1 kHz	23,23	30,27	55,28	71,28
10 kHz	22,82	30,13	54,88	70,79
100 kHz	24,16	32,27	58,45	70,38

Závislost kapacity deskových kondenzátorů na frekvenci pro různé plochy elektrod



Obr. 55 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na frekvenci pro různé plochy elektrod

Dalším krokem bylo ověření závislosti velikosti kapacity na tloušťce dielektrika. Změny tloušťky bylo dosaženo různým rozlišením při tisku dielektrika, konkrétně 1016 a 1693 dpi. Dle očekávání mají křivky naměřených dat hyperbolický charakter. Bylo tak ověřeno, že se zvětšující se vzdáleností mezi elektrodami hodnota kapacity klesá. Výsledky měření jsou zobrazeny v grafech.

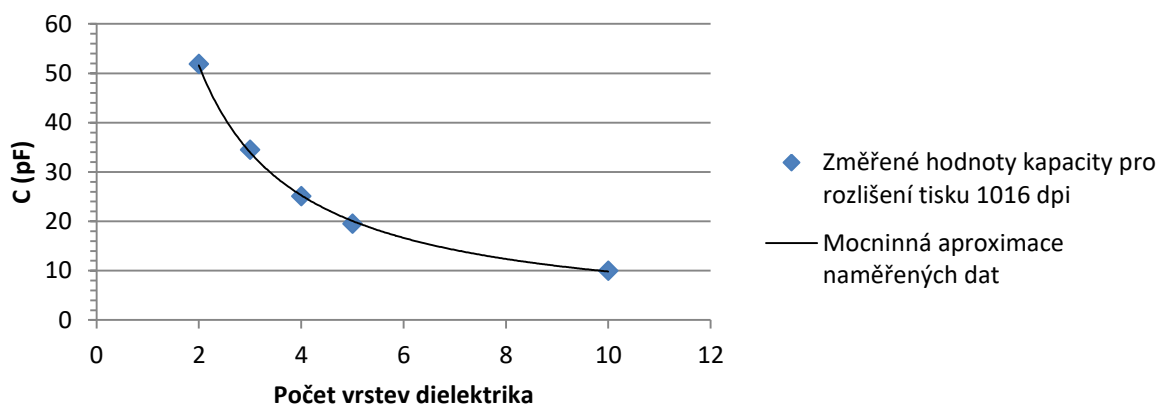
Rozlišení tisku dielektrika SU-8 1016 dpi

Tab. 22 obsahuje průměrné hodnoty naměřených dat pro různé počty vrstev dielektrika s rozlišením tisku 1016 dpi. Data jsou následně vynesena do grafu, viz Obr. 56. Nenachází se zde hodnota pro jednu vrstvu, neboť byl opakovaně zaznamenán zkrat mezi elektrodami a nebylo tak možné kapacitu naměřit. Je patrné jak z grafu, tak z tabulky, že s rostoucím počtem vrstev hodnota kapacity klesá.

Tab. 22 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na počtu vrstev pro rozlišení tisku dielektrika 1016 dpi

Počet vrstev dielektrika	2	3	4	5	10
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	54	35,7	25,9	20	10,45
1 kHz	53,2	35,05	25,435	19,5	10,15
10 kHz	52,85	31,25	25,3	19,35	10,15
100 kHz	56,15	38,3	27,25	21,3	11,55

Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika



Obr. 56 Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika tištěného rozlišením 1016 dpi pro hodnotu frekvence 1 kHz

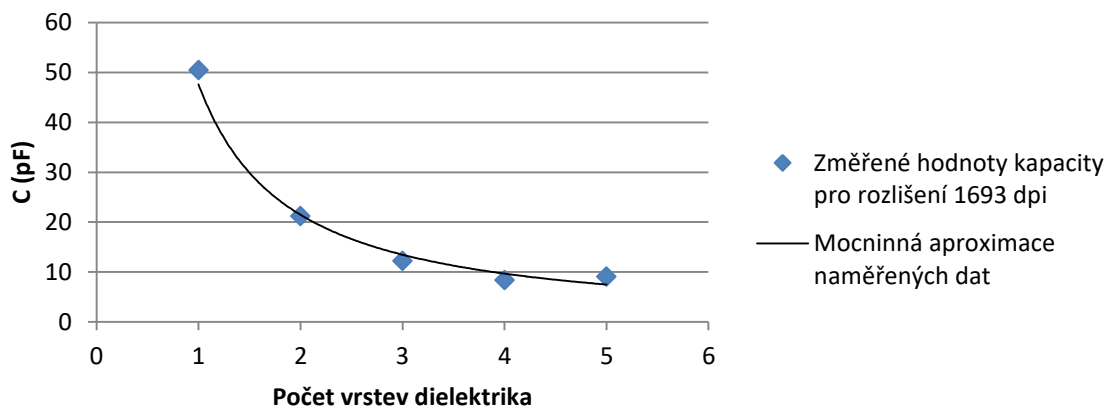
Rozlišení tisku dielektrika SU-8 1693 dpi

Dále byly stejné vzorky vytištěny s rozlišením tisku dielektrika 16963 dpi, což odpovídá nanesení více materiálu v jedné vrstvě. Hodnoty jsou zaznamenány do Tab. 23 a vyneseny do grafu, viz Obr. 57. Při tisku tímto rozlišením bylo vynecháno nanášení deseti vrstev. Z důvodů nízkých kapacit a velké časové náročnosti pro výrobu 5 vrstevých kondenzátorů nebyly 10 vrstvé kondenzátory realizovány. Opět je patrný pokles kapacity s rostoucím počtem vrstev. Lze si však dále povšimnout, že pro 1 vrstvu s tímto rozlišením bylo dosaženo srovnatelné kapacity jako pro 2 s rozlišením 1016 dpi.

Tab. 23 Kapacita deskových kondenzátorů v závislosti na počtu vrstev pro rozlišení tisku dielektrika 1693 dpi

Počet vrstev dielektrika	1	2	3	4	5
	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)	C (pF)
100 Hz	53,2	23,9	11,9	8,9	8,45
1 kHz	50,5	23,4	11,65	8,525	6,95
10 kHz	52,7	23,35	11,6	8,05	7,25
100 kHz	57,5	25,65	13,55	9,425	7,95

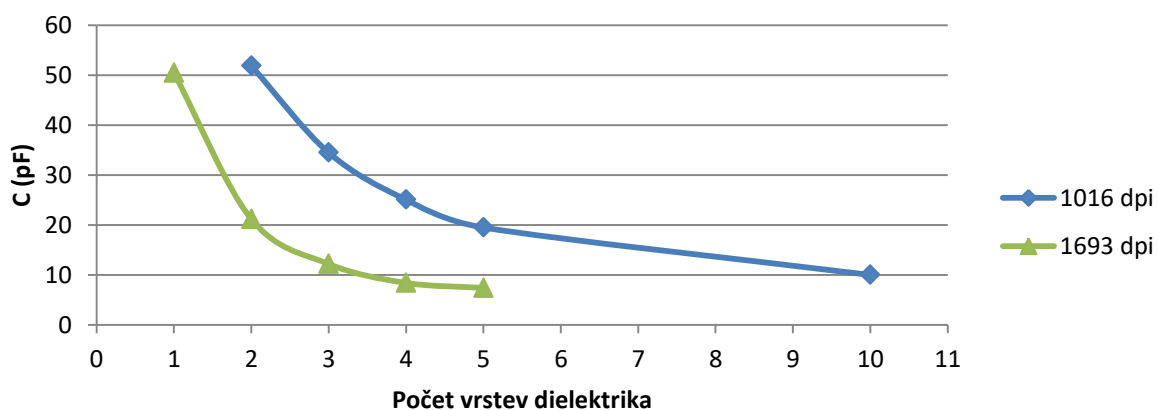
Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika



Obr. 57 Závislost kapacity deskových kondenzátorů na počtu vrstev dielektrika tištěného rozlišením 1693 dpi pro hodnotu frekvence 1 kHz

Na Obr. 58 jsou porovnány hodnoty obou rozlišení v závislosti na počtu vrstev. Je patrný hyperbolický charakter, což potvrdilo naše očekávání.

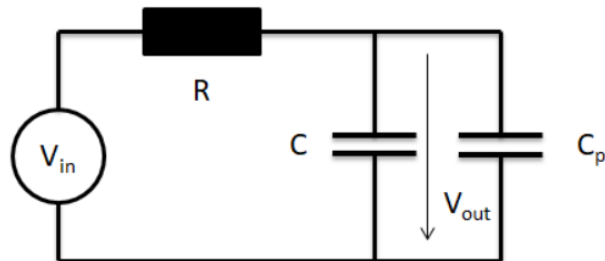
Závislost kapacity deskových kondenzátorů na rozlišení tisku dielektrika



Obr. 58 Závislost kapacity deskových kondenzátorů rozlišení tisku dielektrika, resp. vzdálenosti elektrod

3.1.3 RC článek

Měření RC článků probíhalo pomocí generátoru Rigol DG 1022 a osciloskopu Agilent Infiniium 54833D MSO. Z tohoto osciloskopu byla naměřená data vyexportována a dále zpracována do grafů. Osciloskop disponuje vzorkováním až 4 GSa/s. Na Obr. 59 je vidět schematická značka RC článku včetně vyobrazení vlivu parazitní kapacity.

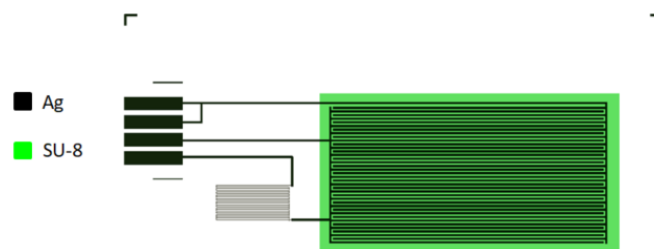


Obr. 59 Schématické zapojení RC článku s vyobrazením parazitní kapacity

RC článek s interdigitálním kondenzátorem

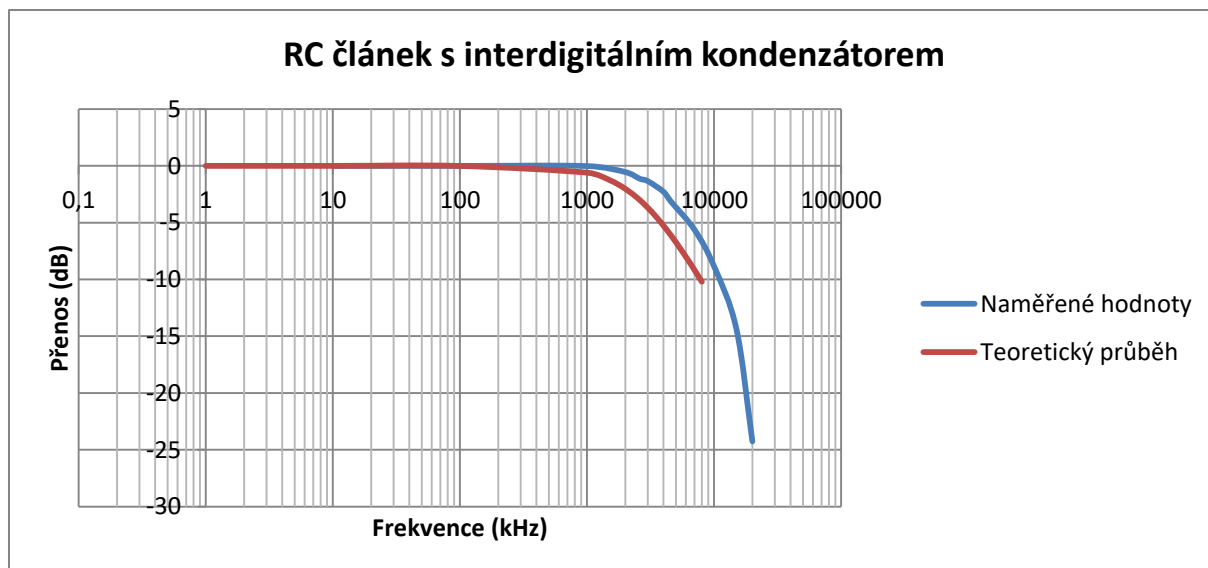
Technologický postup

- 1) Tisk Ag inkoustu, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk SU-8 dielektrického materiálu, 2 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi



Obr. 60 RC článek s interdigitálním kondenzátorem

RC článek byl natištěn nejprve s interdigitálním kondenzátorem, jak je vidět na Obr. 60. Před samotným frekvenčním měřením RC článku byla provedena kontrolní měření jednotlivých komponent. Odpor dosahoval hodnoty 1,9 k Ω , což odpovídalo předpokládané hodnotě. Obdobně tomu bylo i u hodnot kondenzátoru, který měl kapacitu 32 pF. Následně bylo provedeno měření mezní frekvence RC článku. Předběžnými výpočty byla stanovena frekvence 2,617 MHz. Pro sinusový budící signál byla naměřena hodnota 4,6 MHz. Celý průběh je vidět na Obr. 61. Rozdíl v naměřené hodnotě mezní frekvence vůči předpokládané si lze vysvětlit parazitními vlivy, které mohly být způsobeny nedostatečným kontaktem v konektoru.

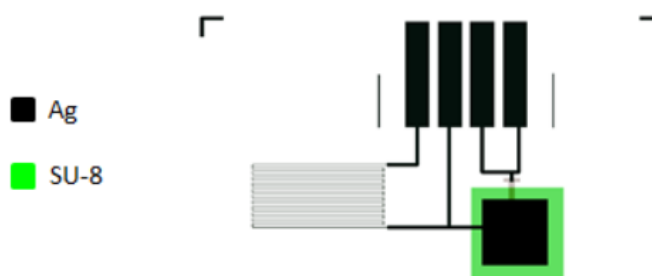


Obr. 61 Frekvenční závislost přenosu RC článku s interdigitálním kondenzátorem

RC článek s deskovými kondenzátory

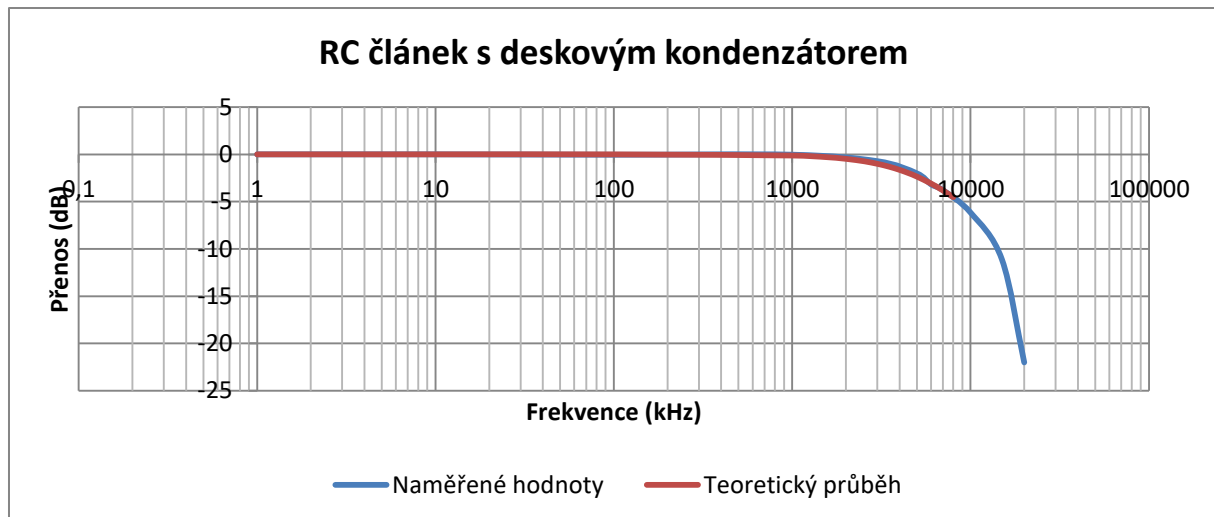
Technologický postup

- 1) Tisk Ag inkoustu, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 2) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min
- 3) Tisk SU-8 dielektrického materiálu, 2 vrstvy, teplota substrátu 31 °C, teplota cartridge 31 °C, rozlišení 1016 dpi
- 4) Tisk Ag inkoustu, 3 vrstvy, teplota substrátu 40 °C, teplota cartridge 35 °C, rozlišení 1016 dpi
- 5) Žihání v sušárně při 130 °C po dobu 30 min



Obr. 62 RC článek s deskovým kondenzátorem

RC článek byl dále natištěn i deskovým kondenzátorem, jak je vidět na Obr. 62. Naměřené hodnoty jednotlivých komponent byly následující: naměřená hodnota odporu byla 1,6 k Ω a hodnota kapacity dosáhla 19 pF. Pro tyto hodnoty byla vypočtena mezní frekvence 5,9 MHz. Pro sinusový budící signál byla naměřena hodnota 6 MHz. Celý průběh je vidět na Obr. 63. V tomto případě se naměřená hodnota velmi blíží té teoretické, lze tedy uvažovat, že v tomto případě nebyl vliv parazitních jevů tak markantní.

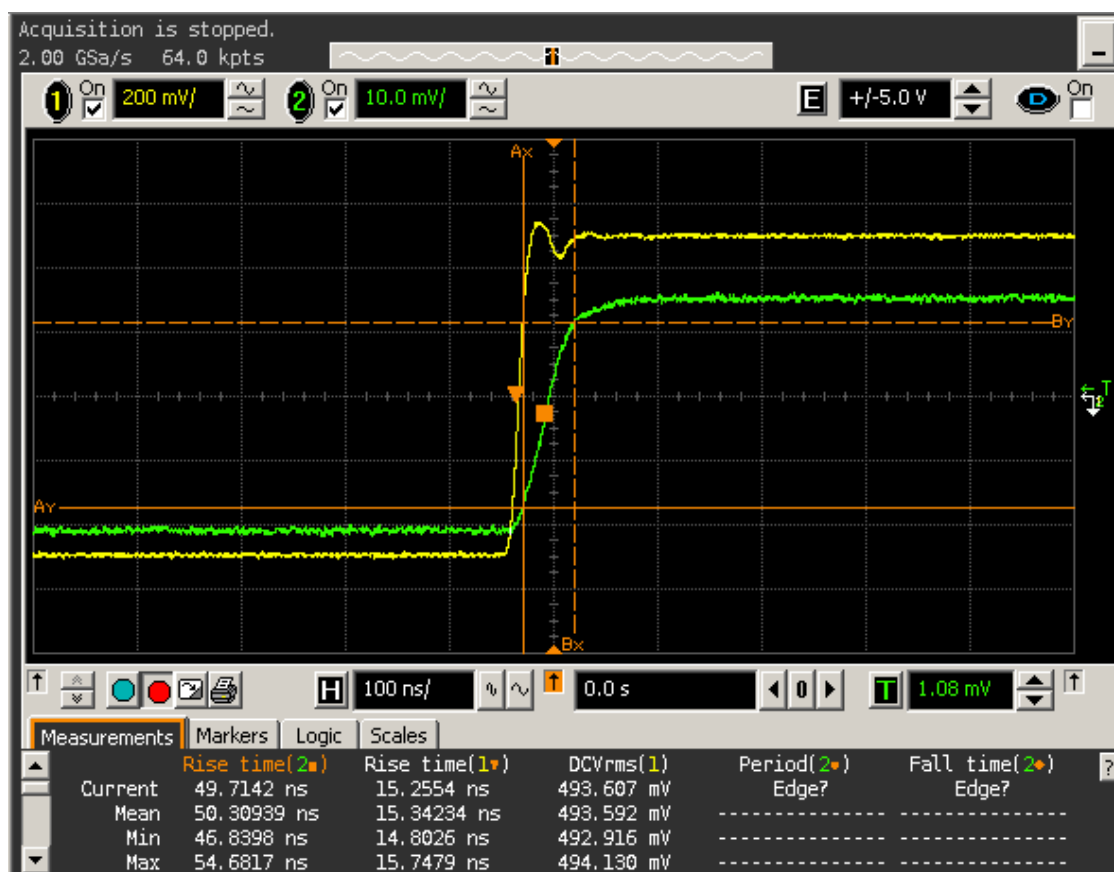


Obr. 63 Frekvenční závislost přenosu RC člunku s deskovým kondenzátorem

Na Obr. 64 je snímek z digitálního osciloskopu, kde je vidět odezva RC člunku na obdélníkový signál, s parametry 500 mV špička-špička a frekvenci 400 kHz. Je zde patrná náběžná hrana nabíjení kondenzátoru. Nicméně při dalším zkoumání bylo zjištěno, že do průběhu silně zasahují parazitní kapacity. Kapacita přívodů od generátoru a osciloskopu činí přibližně 50 – 100pF, v porovnání s kapacitou měřeného kondenzátoru jde tedy minimálně o dvojnásobnou hodnotu a je tím ovlivněn výsledek měření. Teoretický časový průběh nabíjení kondenzátoru by bylo možné dopočítat podle rovnice (5).

$$V_{out} = V_{in}(1 - e^{-t/RC}) - 1 \quad 5)$$

Časová konstanta tištěných RC člunku vychází v desítkách ns (pro RC člunek s deskovým kondenzátorem konkrétně 26 ns) a odpovídá přibližně 66 % hodnoty napětí. Oproti tomu naměřená hodnota na osciloskopu je díky parazitním kapacitám přibližně dvojnásobná. Nebylo tak možné do grafu doplnit i tento teoretický průběh. Pro ověření bylo provedeno stejné měření i s běžnými součástkami, kdy bylo dosaženo stejného výsledku.

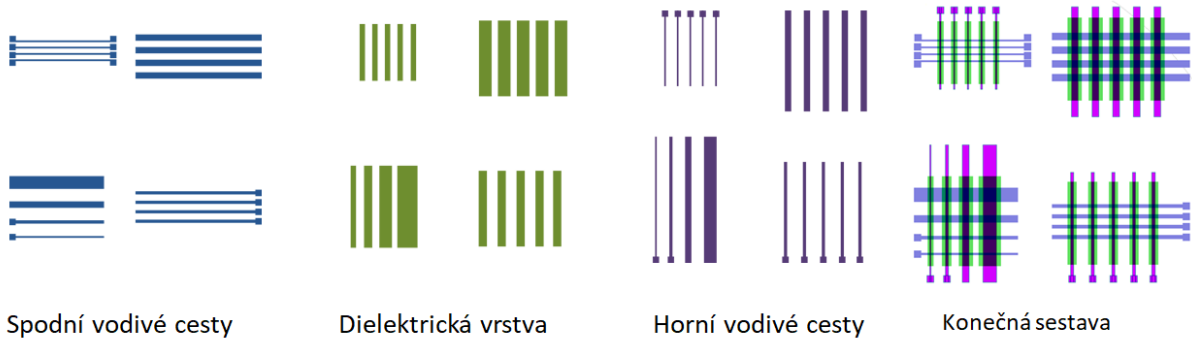


Obr. 64 Odezva RC článku na obdélníkový budící signál

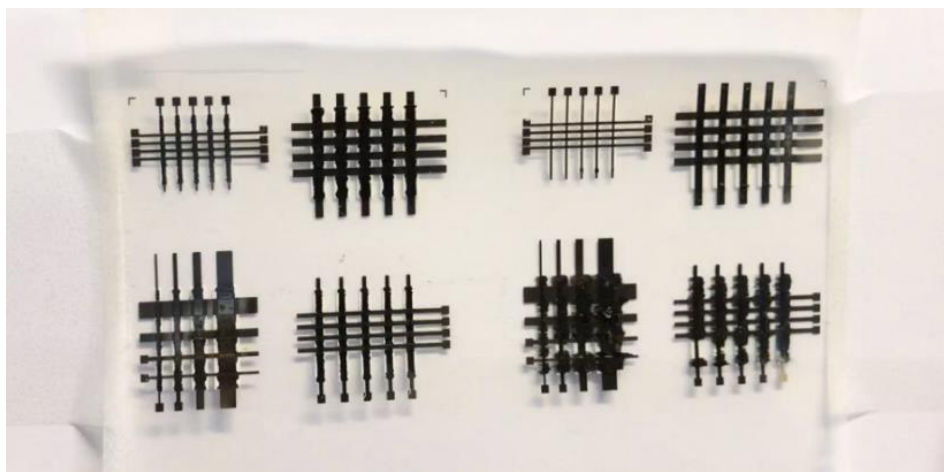
3.2 KŘÍŽENÍ VODIVÝCH CEST

V rámci této práce byl natištěn i motiv křížení vodivých cest. Postup tisku odpovídal tisku deskových kondenzátorů. Nejprve byly natištěny spodní vodivé linky. Ty měly šířku od 250 μm do 5 mm a byly různě zkombinovány. Po vysušení spodní vodivé vrstvy byl nanesen izolační materiál SU-8 v kolmém směru na spodní vodivé cesty ve dvou, resp. třech vrstvách s rozlišením tisku 1016 dpi. Opět proběhlo zesíťování v UV ozone cleaneru a vytvrzení v sušárně. Na takto připravený izolační materiál byly natištěny opět vodivé cesty. Tisknutý motiv jednotlivých vrstev je vidět na Obr. 65, Obr. 66 pak ukazuje vytištěné vzorky. Zde je patrné, že u širších vzorů docházelo k rozlévání inkoustu až za okraj dielektrického materiálu, což mělo za důsledek zkratování vodivých cest. To je způsobené nejspíše zaobleným povrchem dielektrického materiálu. Bez detailního prozkoumání profilu natištěných vrstev toto však nelze stoprocentně potvrdit. Dále bylo patrné pomalejší vysychání u širších čar, díky čemuž mohlo snáze docházet k rozlévání inkoustu. U úzkých čar proběhlo vyschnutí inkoustu rychleji a k rozlévání tak nedocházelo. Jako vhodné použití tak z tohoto experimentu vychází použití spíše více užších cest, které budou před a za křížením spojené v jednu širší, pokud bude třeba. Úspěšného křížení v případě cest širokých 250 μm bylo dosaženo jak pro 3 tak i pro 2 vrstvy dielektrického materiálu s rozlišením 1016 dpi. Detailní fotka z mikroskopu tohoto motivu je pak na Obr. 67.

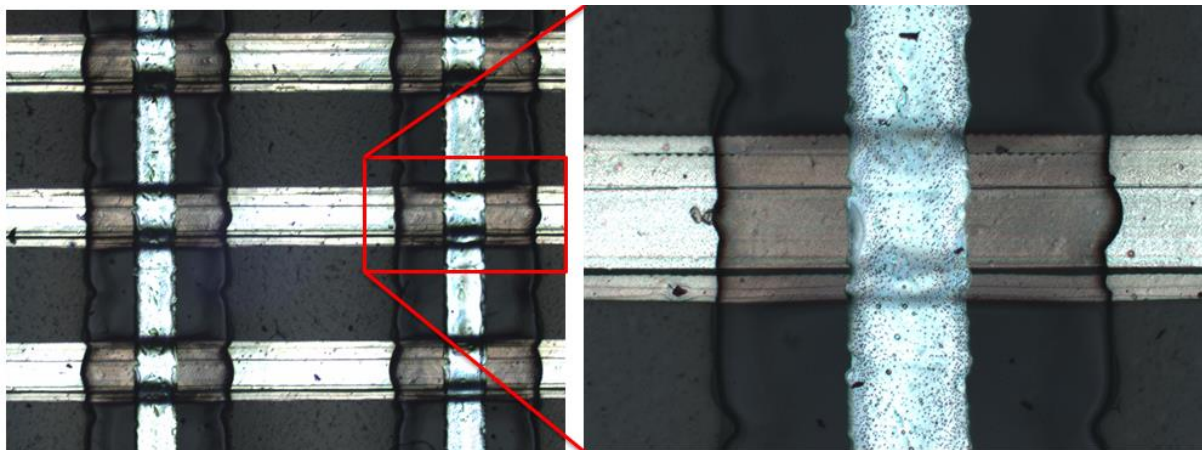
Charakterizace natisknutých vzorků



Obr. 65 Motiv jednotlivých vrstev pro tisk křížení vodivých cest a konečné sestavy



Obr. 66 Natištěné struktury s křížením vodivých cest. U širších motivů docházelo k rozlívání inkoustu



Obr. 67 Detail křížení vodivých cest pořízený mikroskopem

4 Srovnání výsledků, návrh dalšího postupu

4.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

4.1.1 Materiály s bezchybným tiskem

Získání požadovaných výsledků, tj. bezproblémový tisk a požadované hodnoty kapacity bylo dosaženo pro většinu tištěných struktur.

Dobrych výsledků bylo dosaženo při tisku interdigitálních kondenzátorů jak se vzduchovým dielektrikem, tak s dielektrickými materiály, konkrétně c-PVP a SU-8. Dielektrický materiál se podařilo úspěšně natisknout a vytvrdit. Materiál se na substrátu choval stabilně, nebylo tedy třeba provádět žádné další úpravy.

Deskové kondenzátory se úspěšně podařilo realizovat pomocí dielektrického materiálu SU-8. Povrch dielektrického materiálu se choval stabilně a vykazoval obdobné vlastnosti jako například sklo. Pomocí změnou rozlišení při tisku a plochy elektrod bylo dosaženo změny hodnoty kapacity kondenzátoru.

4.1.2 Materiály, u nichž je nutné vlastnosti dále optimalizovat

Při tisku deskových kondenzátorů s dielektrickým materiálem c-PVP bylo dosaženo úspěšného tisku až při velkém počtu vrstev dielektrického materiálu. To však činí materiál nepříliš vhodným pro tisk více vrstevných struktur, neboť proces se stává velmi časově i materiálově náročným. Při menším počtu vrstev dochází k propíjení stříbrného inkoustu horní desky kondenzátoru do dielektrického materiálu a může tak dojít i ke kontaktu se spodní elektrodou. Příčinou tohoto problému se zdají být bublinky obsažené v inkoustu, které se přenesou i do natištěné vrstvy. Těmito dírami pak dochází k propíjení vodivého inkoustu.

Pro optimalizaci tisku tímto inkoustem a odstranění nežádoucích bublinek bude nutné provést několik dalších zkušebních tisků, kdy bude upraven postup zesíťování a vytvrzení materiálu.

4.1.3 Návrh dalšího postupu

V této práci byl popsán postup tisku deskových a interdigitálních kondenzátorů s jedním, respektive dvěma dielektrickými materiály. Plného úspěchu bylo dosaženo pro materiál SU-8, více pozornosti však bude nutné věnovat materiálu c-PVP. Zde bude ještě nutné upravit materiál tak, aby byl povrch nepropustný a bylo tak možné oddělit vodivé inkousty. Tímto materiálem lze tisknout tenké vrstvy, díky čemuž by mohly být úspěšně realizovány kompletně tištěné tranzistory, kde jsou tenké vrstvy nezbytné. V případě SU-8 jsou nanášené vrstvy silnější a v případě jedné vrstvy není dosaženo dostatečné uniformity pro tisk dalších vrstev.

Materiál c-PVP byl připraven přímo na katedře, je tedy možné že bublinky se do materiálu dostali již při výrobě, konkrétně tedy při míchání inkoustu. Pozornost bych tedy věnoval například odladění postupu přípravy tohoto inkoustu. Dále bych věnoval pozornost odladění vytvrzení inkoustu. Tento

materiál nevyžaduje vytvrzení pomocí UV záření, ale je nezbytná vyšší teplota – 150 -200 °C. Při této teplotě však již dochází k degradaci PET folie. Substrát se začíná více kroutit a mění barvu do žlutého odstínu. Při této teplotě také může docházet změnám materiálových vlastností vodivého inkoustu spodní elektrody. Bude tedy nutné provést ještě několik kontrolních tisků k ověření těchto hypotéz. Vhodné by také bylo použití substrátu z materiálu PEN, který má vyšší odolnost vůči vysokým teplotám (až 200 °C). Bude také nutné ověřit další způsoby vytvrzování, kdy se inkoust zahřeje nejprve na 100 °C po dobu 20 min a poté na 200 °C na dalších 20 min. [32] Při prvních 20 minutách by mělo dojít k postupnému vytvrzení materiálu, při dalších 20 min by mělo dojít k úpravě hydrofobicity materiálu.[33] Případně se lze zabývat dalšími možnostmi, které jsou popsány v několika dalších publikacích. [34][35]

Existují však další dielektrické materiály, kterými by bylo vhodné provést tisk dielektrických vrstev. Takovým je třeba materiál PMMA, který je možné také připravovat přímo v laboratoři ve větším množství. Díky tomu se významně snižuje cena výsledného materiálu, oproti materiálu SU-8 jde o snížení asi na ¼ ceny.

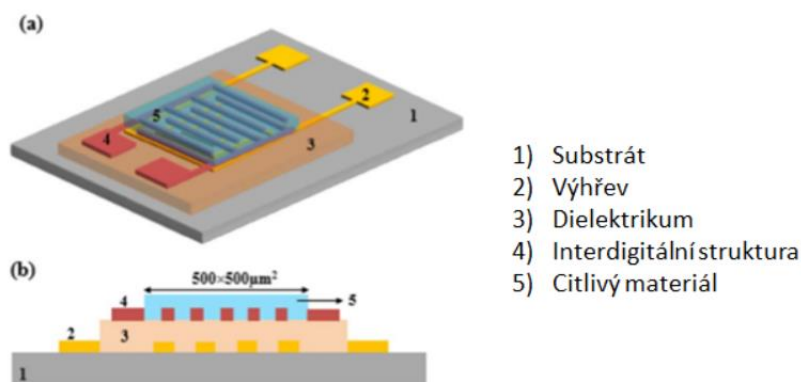
Dalším příkladem dielektrického materiálu je inkoust od firmy Sun Tronic. Jde o materiál, který je vytvrzovaný pomocí UV záření a je vhodný pro nízkoteplotní výrobu motivů s dielektrickými vrstvami.

Při tisku struktur zabralo nejvíce času žíhání a vytvrzování pomocí sušárny. Pro zrychlení procesu by bylo vhodné využít fotonického žíhání. To by zrychlilo celý proces žíhání nebo vytvrzování jen na několik minut. Díky tomu by bylo možné mnohem rychleji vytvářet složitější struktury, které vyžadují nanášení více materiálů, jako například tištěný tranzistor. Pořízení fotonického žíhání je v plánu v řádu několika měsíců.

Jak bylo zmíněno, tisk tenkých dielektrických vrstev umožňuje realizaci:

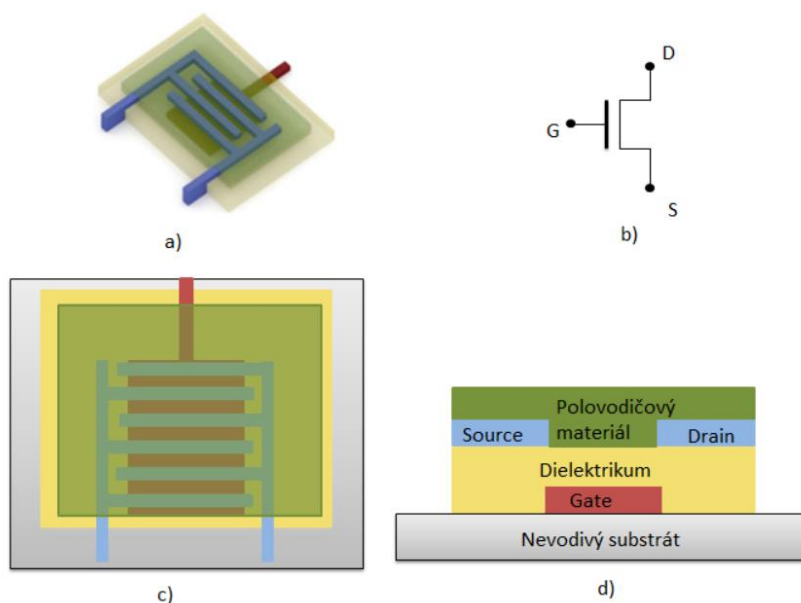
- tištěné senzory – oddělovací vrstva mezi výhřevem a vlastní interdigitální strukturou a citlivou vrstvou (u senzorů plynů je obvykle nutné vyhřívat citlivou vrstvu) viz Obr. 68. Výroba takového senzoru by odpovídala následujícímu popisu: Na vybraný substrát by byla nanášena nejprve vrstva vodivého inkoustu s motivem meandru, který slouží pro vyhřívání. Vyhřívací element je následně překryt dielektrickým materiálem, který také slouží jako podkladová vrstva pro tisk hřebenového motivu vytištěného vodivým inkoustem. A na tuto interdigitální strukturu je nakonec natištěna citlivá vrstva (např. ZnO a jiné oxidy kovů, organické vodivé polymery jako Polyaniline, atd.). Na závěr je pak možné senzory uspořádat do matice. Inspirací toho by mohla být publikace [36], kde byla podobná struktura vyrobena pomocí inkjet tisku. Taková metoda jednostranného tisku je technologicky snáze realizovatelná, neboť zde není nutné ošetření substrátu z obou stran, vyhřívá se jen natištěná struktura a je jednodušší provést sesazení jednotlivých vrstev. Naproti tomu při oboustranném tisku je zapotřebí oboustranné ošetření substrátu, při vyhřívání je nejprve nutné prohřát substrát, než se ohřejí natištěné vrstvy. Problém též představuje sesazení tištěných vrstev, kdy je nutné se zabývat sesazením skrz substrát. Tento způsob tisku byl proveden v publikaci [37].

Srovnání výsledků, návrh dalšího postupu



Obr. 68 Příklad plně tištěného senzoru s integrovaným výhřevem. A) 3D pohled, b) řez strukturou s jednotlivými vrstvami. Převzato, upraveno z [36]

- plně tištěné tranzistory – dielektrická izolační vrstva hradla, viz Obr. 69. Tisk takového tranzistoru by probíhal následovně: Na vybraný substrát by byla nanášena Gate elektroda vodivým inkoustem. Ta je následně překryta dielektrickým materiálem, který slouží pro oddělení ostatních elektrod. Následně jsou natištěny elektrody Souce a Drain vodivým inkoustem s interdigitálním motivem. Ty jsou na závěr překryty polovodičovým materiálem. Struktura tohoto typu tranzistoru je vhodná i pro senzorové aplikace.



Obr. 69 Návrh tištěného tranzistoru; a) 3D zobrazení, b) schématická značka, c) pohled shora, d) průřez vrstvami tištěného tranzistoru. Převzato, upraveno z [38]

Konečně pro získání komplexnějších znalostí o natištěných vzorcích by bylo vhodné provést detailnější charakterizaci. Tím by mělo být impedanční měření pro zjištění chování vzorků při vyšších frekvencích. Dále bych doporučil prověření vlivu parazitních jevů pro jednotlivé vzorky a pokusit se najít řešení k jejich eliminaci. Při řešení vzniku trhlin a bublinek v dielektrických materiálech by bylo vhodné použít rastrovací elektronový mikroskop, který by odhalil tloušťku a nehomogenity v materiálu a bylo by tak možné lépe hledat řešení k jejich odstranění.

5 Závěr

V rámci této práce jsem se zabýval procesem optimalizace výroby tištěných kondenzátorů na flexibilním substrátu technologií materiálového tisku. K realizaci tištěných struktur byla využita materiálová tiskárna Dimatix DMP 2831, která se nachází v laboratoři nanolitografie katedry mikroelektroniky FEL ČVUT.

Provedl jsem popis dielektrických materiálů, které jsou vhodné k použití pro nízkoteplotní proces výroby tištěných kondenzátorů. Zejména jsem se soustředil na materiály, které jsou vhodné k tisku dostupnou tiskárnou na katedře.

Na základě získaných vědomostí jsem provedl popis procesu tisku kondenzátorů metodou Inkjet a popsal technologický průběh. Popsal jsem materiály použité pro výrobu kondenzátorů a metody vytvrzování inkoustů. Tomu je věnována kapitola 2.

Třetí kapitola je pak věnována samotné realizaci tištěných kondenzátorů. Všechny struktury byly tištěny na PET folii. Jako první typ jsem zvolil interdigitální kondenzátory. Úspěšně byly realizovány struktury jak se vzduchovým dielektrikem, tak dále s dielektrickými materiály c-PVP a SU-8, kterými byly struktury pokryty. Úspěšně se podařilo realizovat i měření za pomoci konektorů, do kterého byly kondenzátory připojeny.

S úspěchem byly také realizované deskové kondenzátory. Jako dielektrický materiál zde byl použit materiál SU-8, u kterého jsem optimalizoval postup zesíťování a vytvrzení tak, aby bylo možné úspěšně nanášet horní elektrodu. U těchto struktur se podařilo ověřit závislost hodnoty kapacity jak na velikosti plochy elektrod, tak také na vzdálenosti elektrod.

Po výrobě a charakterizaci jednotlivých kondenzátorů byly navrženy motivy RC článků s interdigitálním a deskovým kondenzátorem. U RC článků bylo dále provedeno frekvenční měření mezní frekvence. Výsledky měření byly zpracovány do grafů.

Díky získaným znalostem při tisku deskových kondenzátorů se podařilo odladit také křížení vodivých cest tak, aby nedocházelo ke zkratování jednotlivých vrstev a bylo tak možné je použít v dalších aplikacích, např. vícevrstvé tištěné spoje pro flexibilní hybridní elektroniku a vyvedení vnitřního kontaktu planární cívky apod.

U natištěných struktur jsem dále provedl základní charakterizaci jejich elektrických vlastností. Pro každý vzorek jsem provedl měření kapacity v závislosti na frekvenci. Výsledky jsem zpracoval do tabulek a vynesl do grafů.

Během tisku byly také pořizovány obrázky, aby bylo možné porovnávat výsledky jednotlivých struktur. Obrázky jsem dále zpracoval do samostatného dokumentu a umístil jej do přílohy Ukázky realizovaných struktur.

V kapitole 4 jsem provedl shrnutí dosažených výsledků a navrhl další možné struktury k tisku a postupy k odladění dalších dielektrických materiálů pro dosažení větších kapacit díky tenčím vrstvám dielektrika.

6 Použitá literatura a zdroje

- [1] F. Garnier, R. Hajlaoui, A. Yassar, and P. Srivastava, "All-polymer field-effect transistor realized by printing techniques," *Science* (80-.), 1994.
- [2] Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, "High-Performance Plastic Transistors Fabricated by Printing Techniques," *Chem. Mater.*, 1997.
- [3] J. Tate *et al.*, "Anodization and microcontact printing on electroless silver: Solution-based fabrication procedures for low-voltage electronic systems with organic active components," *Langmuir*, 2000.
- [4] Z. Bao, J. A. Rogers, and H. E. Katz, "Printable organic and polymeric semiconducting materials and devices," *Journal of Materials Chemistry*. 1999.
- [5] H. Sirringhaus *et al.*, "High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits," *Science* (80-.), 2000.
- [6] T. Kawase, H. Sirringhaus, R. H. Friend, and T. Shimoda, "Inkjet printed via-hole interconnections and resistors for all-polymer transistor circuits," *Adv. Mater.*, 2001.
- [7] T. R. Hebner, C. C. Wu, D. Marcy, M. H. Lu, and J. C. Sturm, "Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices," *Appl. Phys. Lett.*, 1998.
- [8] Y. Yang, S. C. Chang, J. Bharathan, and J. Liu, "Organic/polymeric electroluminescent devices processed by hybrid ink-jet printing," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2000.
- [9] S. B. Fuller, E. J. Wilhelm, and J. M. Jacobson, "Ink-jet printed nanoparticle microelectromechanical systems," *J. Microelectromechanical Syst.*, 2002.
- [10] Y. Liu, T. Cui, and K. Varahramyan, "All-polymer capacitor fabricated with inkjet printing technique," *Solid. State. Electron.*, 2003.
- [11] B. J. Kang, C. K. Lee, and J. H. Oh, "All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate," *Microelectron. Eng.*, 2012.
- [12] B. S. Cook *et al.*, "Inkjet-printed, vertically-integrated, high-performance inductors and transformers on flexible LCP substrate," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2014.
- [13] B. S. Cook, B. Tehrani, J. R. Cooper, and M. M. Tentzeris, "Multilayer inkjet printing of millimeter-wave proximity-fed patch arrays on flexible substrates," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2013.
- [14] J. Bito, B. Tehrani, B. Cook, and M. Tentzeris, "Fully inkjet-printed multilayer microstrip patch antenna for Ku-band applications," in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2014.
- [15] B. K. Tehrani, B. S. Cook, and M. M. Tentzeris, "Post-process fabrication of multilayer mm-wave on-package antennas with inkjet printing," in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2015.
- [16] V. Correia *et al.*, "Design and fabrication of multilayer inkjet-printed passive components for printed electronics circuit development," *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 364–371, 2018.
- [17] Y. Li, R. Torah, S. Beeby, and J. Tudor, "An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly(4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications," *Proc. IEEE Sensors*, 2012.
- [18] C. Sriprachubwong, C. Srichan, T. Lomas, and A. Tuantranont, "Simple RC low pass filter circuit fabricated by unmodified desktop inkjet printer," in *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, 2010.
- [19] J. Lim *et al.*, "All-inkjet-printed Metal-Insulator-Metal (MIM) capacitor," *Curr. Appl.*

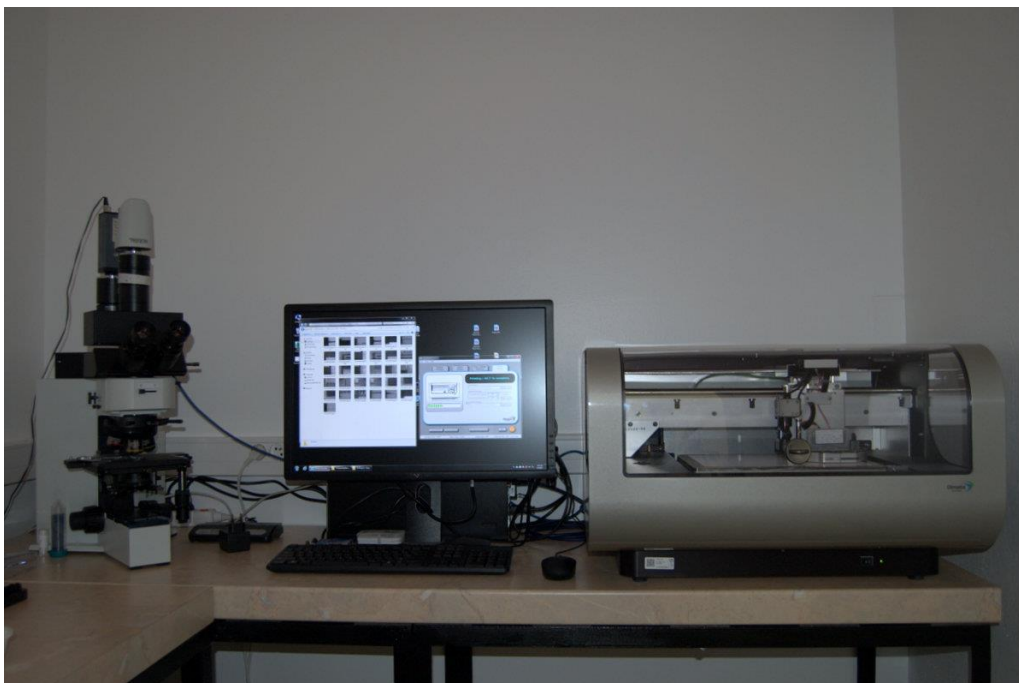
- Phys.*, vol. 12, no. SUPPL. 1, pp. e14–e17, 2012.
- [20] Y. Li, R. Torah, S. Beeby, and J. Tudor, “An all-inkjet printed flexible capacitor for wearable applications,” *Proc. IEEE Sensors*, 2012.
- [21] H. W. Tan, T. Tran, and C. K. Chua, “A review of printed passive electronic components through fully additive manufacturing methods,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 11, no. 4, pp. 271–288, 2016.
- [22] N. Zoric, A. Iavorschi, M. Sireteanu, G. Viziteu, and R. Ciobanu, “Design and Simulations of Idc Sensor Using Comsol Multiphysics and Dielectric,” no. 4, pp. 63–69, 2013.
- [23] I. Shevchenko, “Příprava a charakterizace organických elektronických součástek,” p. 75, 2017.
- [24] B. S. Cook, J. R. Cooper, and M. M. Tentzeris, “Multi-layer RF capacitors on flexible substrates utilizing inkjet printed dielectric polymers,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 23, no. 7, pp. 353–355, 2013.
- [25] Sigma-Aldrich, “736465 ALDRICH,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/736465?lang=en®ion=CZ>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [26] MicroChem, “XP PriElex SU-8 Process Guidelines,” no. 617, pp. 1–5, 2019.
- [27] E. Sowade *et al.*, “All-inkjet-printed thin-film transistors: Manufacturing process reliability by root cause analysis,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. April, pp. 1–15, 2016.
- [28] D. Gamota, P. Brazis, K. Kalyanasundaram, and J. Zhang, *PRINTED ORGANIC AND MOLECULAR ELECTRONICS*. Boston I Dordrecht I New York I London, 2004.
- [29] “No Title.” [Online]. Available: <http://www.novacentrix.com/>.
- [30] W. Zapka, *Handbook of Industrial Inkjet Printing*. 2018.
- [31] “Spektrum UV ozone cleaneru.” [Online]. Available: <http://www.bhkinc.com/index.cfm?action=products>.
- [32] J. Ha, S. Chung, M. Pei, K. Cho, H. Yang, and Y. Hong, “One-Step Interface Engineering for All-Inkjet-Printed, All-Organic Components in Transparent, Flexible Transistors and Inverters: Polymer Binding,” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 10, pp. 8819–8829, 2017.
- [33] E. R. i Garcia, “Inkjet Printed Microelectronic Devices and Circuits,” no. September, 2014.
- [34] “An All Inkjet Printed Capacitor on Glass Substrate Using Solvent Based (PVP) Ink,” pp. 2788–2792, 2016.
- [35] L. Feng, C. Jiang, H. Ma, X. Guo, and A. Nathan, “All ink-jet printed low-voltage organic field-effect transistors on flexible substrate,” *Org. Electron. physics, Mater. Appl.*, vol. 38, pp. 186–192, 2016.
- [36] S. Khan and D. Briand, “All-printed low-power metal oxide gas sensors on polymeric substrates,” *Flex. Print. Electron.*, vol. 4, no. 1, p. 015002, 2018.
- [37] S. Claramunt *et al.*, “Flexible gas sensor array with an embedded heater based on metal decorated carbon nanofibres,” *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 187, pp. 401–406, 2013.
- [38] M. Mashayekhi, *Inkjet-Configurable Gate Array*. .

Seznam Příloh

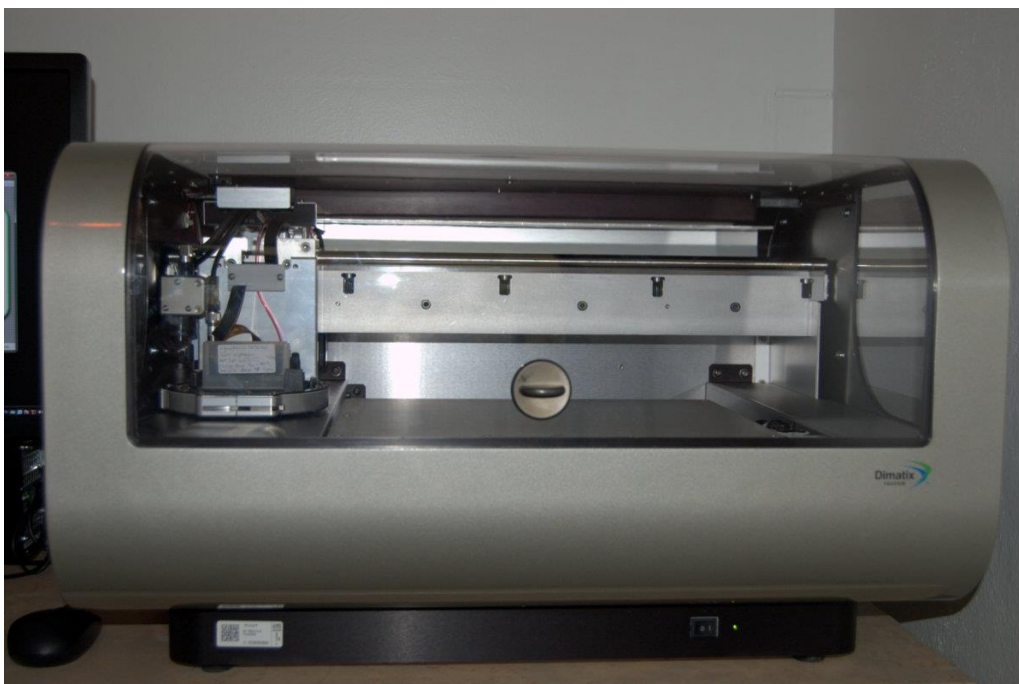
- A) Vybavení laboratoře
- B) Grafy deskových kondenzátorů
- C) Diagram procesu Inkjet tisku
- D) Ukázky realizovaných struktur

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 diplomové práce.



Obrázek 1 Pracoviště materiálového deponičního 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



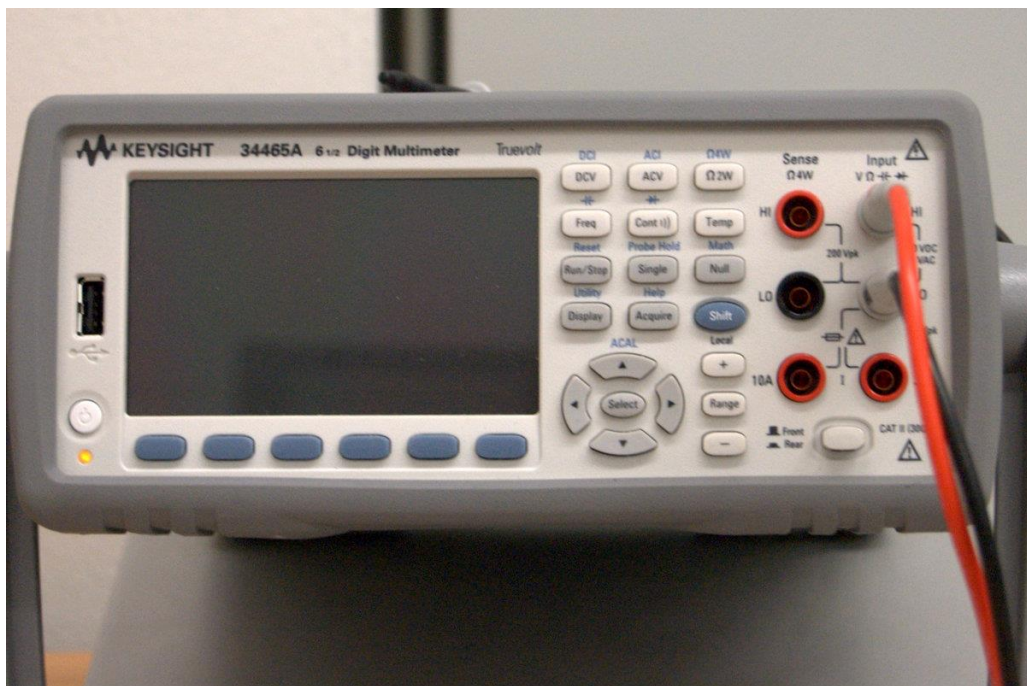
Obrázek 5 UV osvitová jednotka ProMa



Obrázek 6 Ultrazvuková čistička JeKen PS-20A



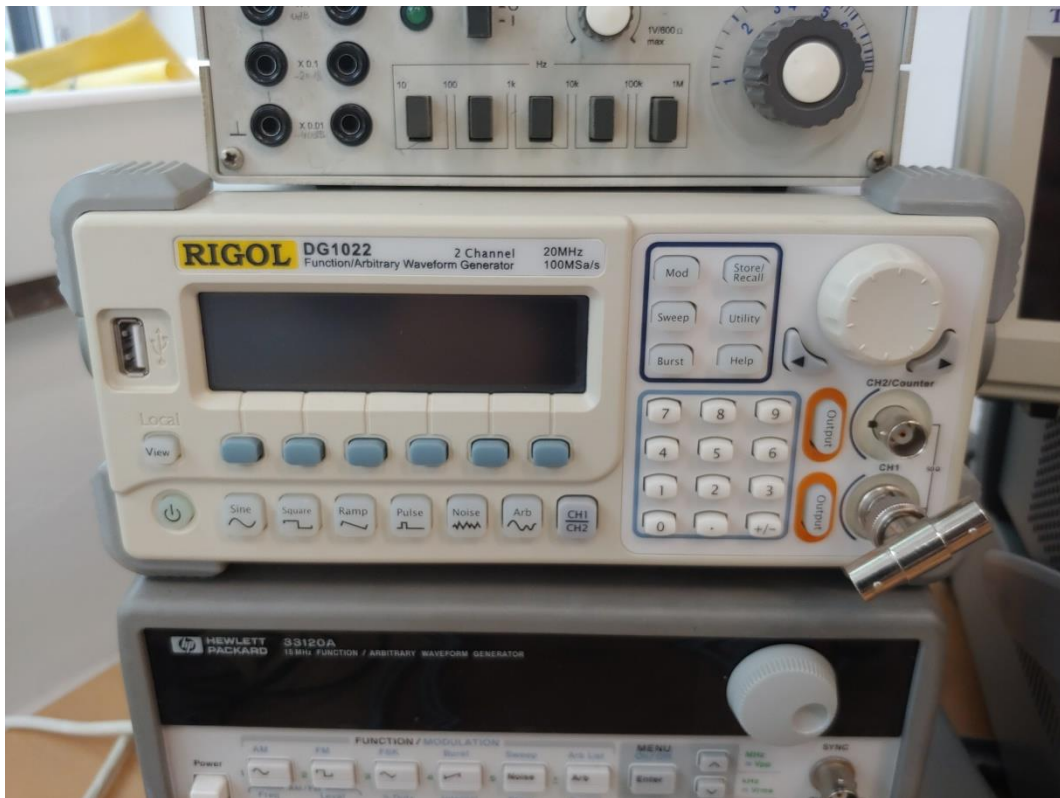
Obrázek 7 Laboratorní plotýnka P-LAB SD160



Obrázek 8 Digitální multimetr Keysight 34456A



Obrázek 9 Měřicí RLC můstek Hameg LCR HM 8118



Obrázek 10 Generátor signálu Rigol DG 1022



Obrázek 11 Digitální osciloskop Agilent Infiniium 54833 D



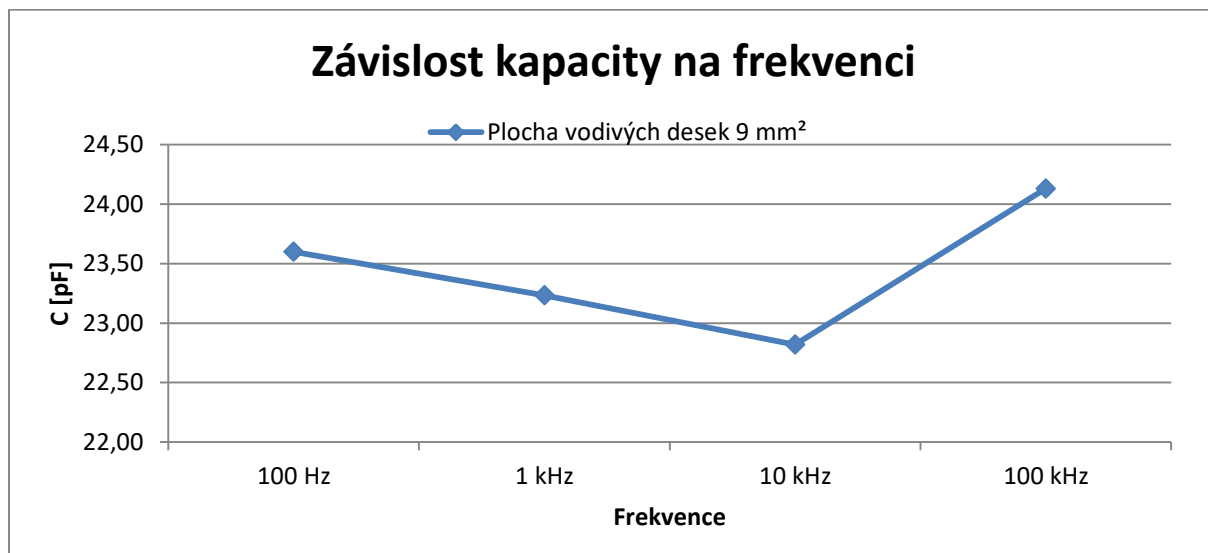
Obrázek 12 Digitální mikroskop Olympus Promicra



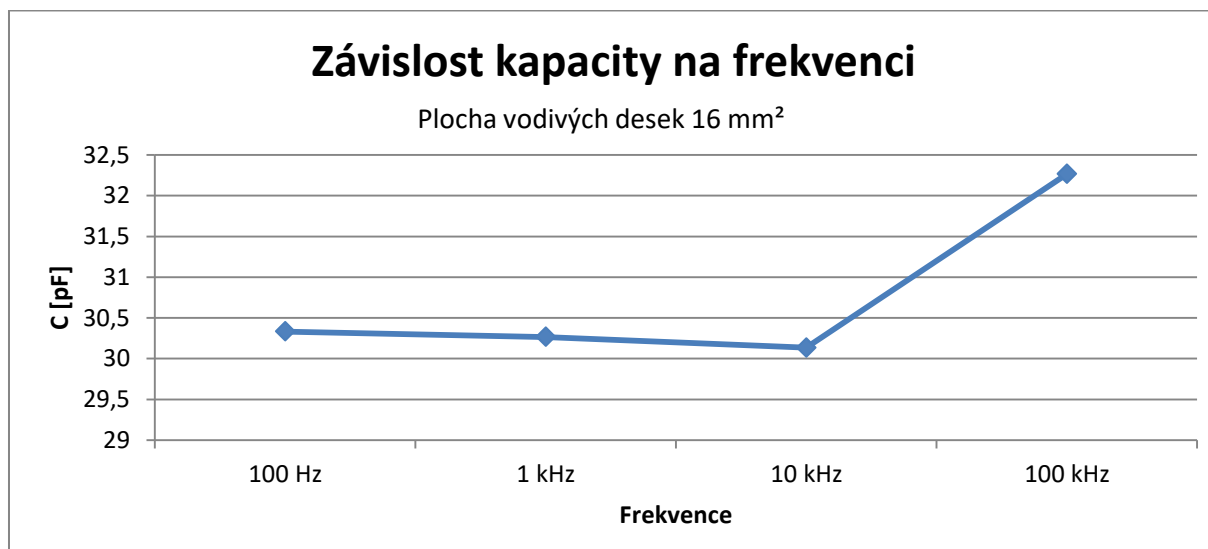
Obrázek 13 AFM mikroskop

Grafy deskových kondenzátorů

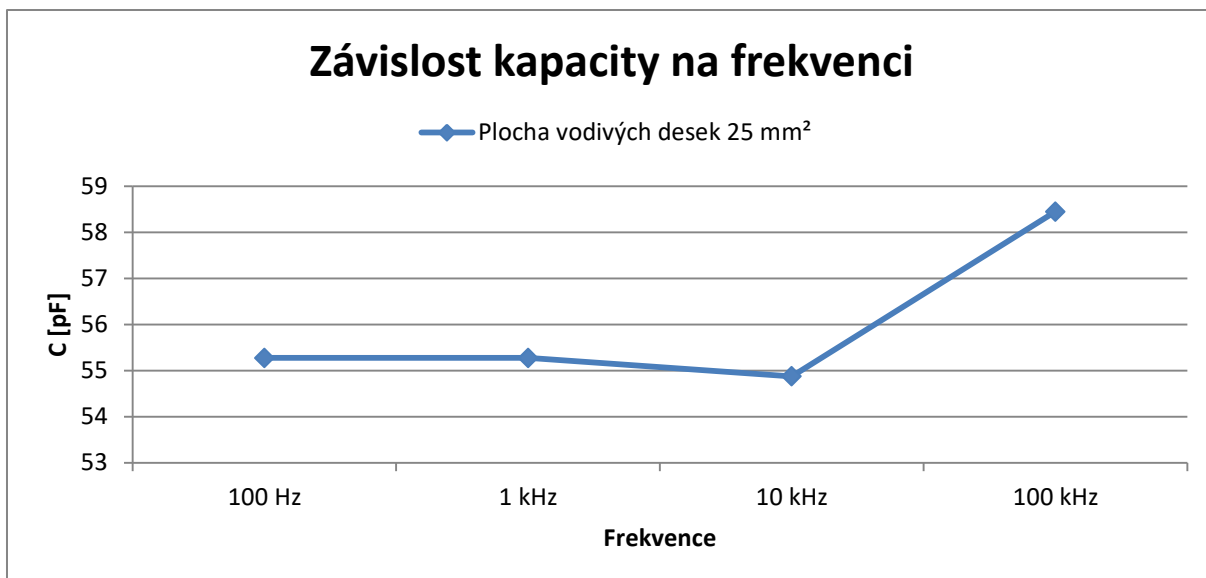
V této příloze jsou grafy jednotlivých deskových kondenzátorů pro plochy elektrod 9, 16, 25 a 36 mm² pro jednotlivé frekvence.



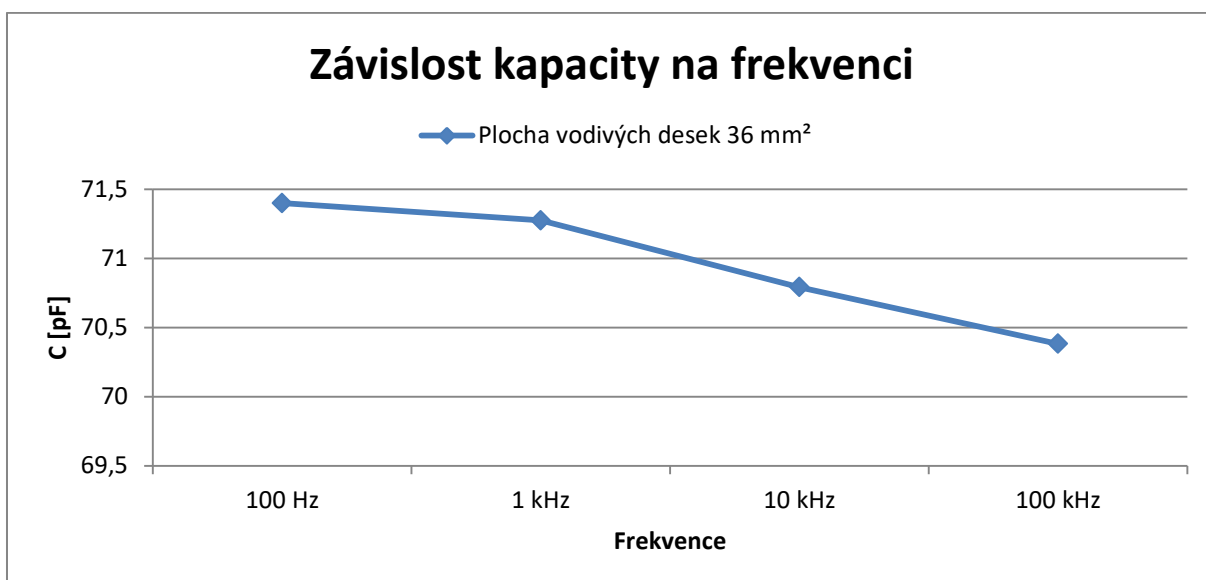
Závislost kapacity deskového kondenzátoru na frekvenci s plochou desek 9 mm²



Závislost kapacity deskového kondenzátoru na frekvenci s plochou desek 16 mm²

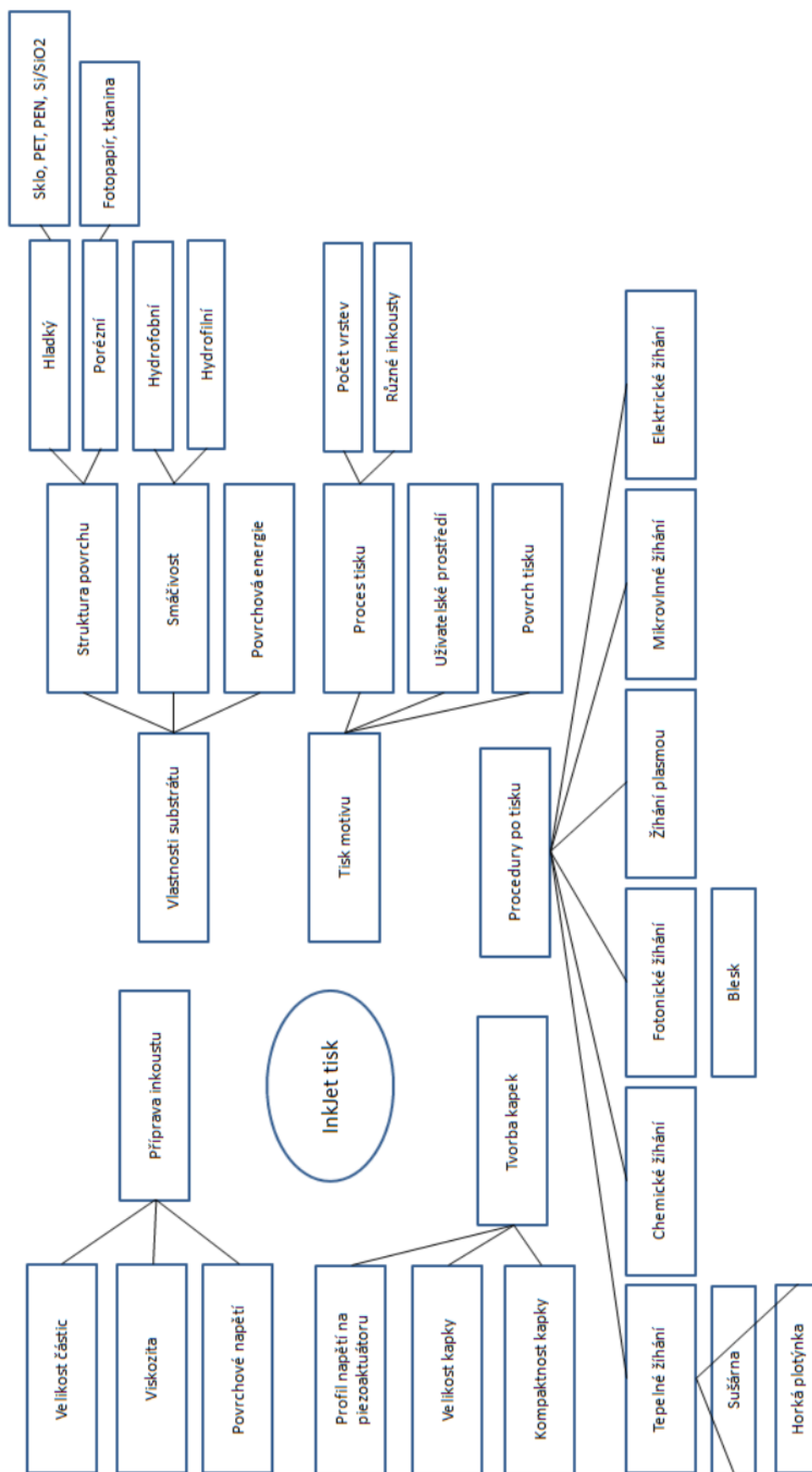


Závislost kapacity deskového kondenzátoru na frekvenci s plochou desek 36 mm²

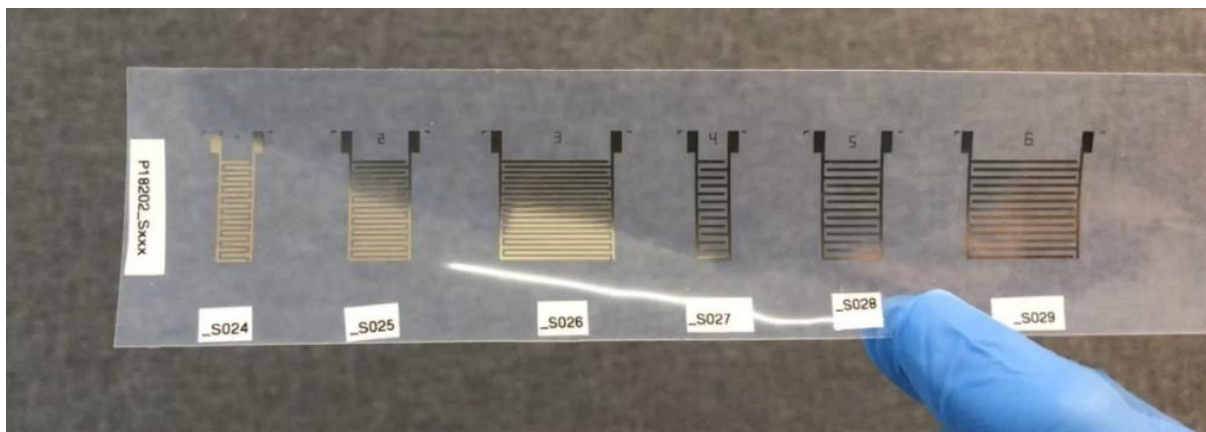


Závislost kapacity deskového kondenzátoru na frekvenci s plochou desek 36 mm²

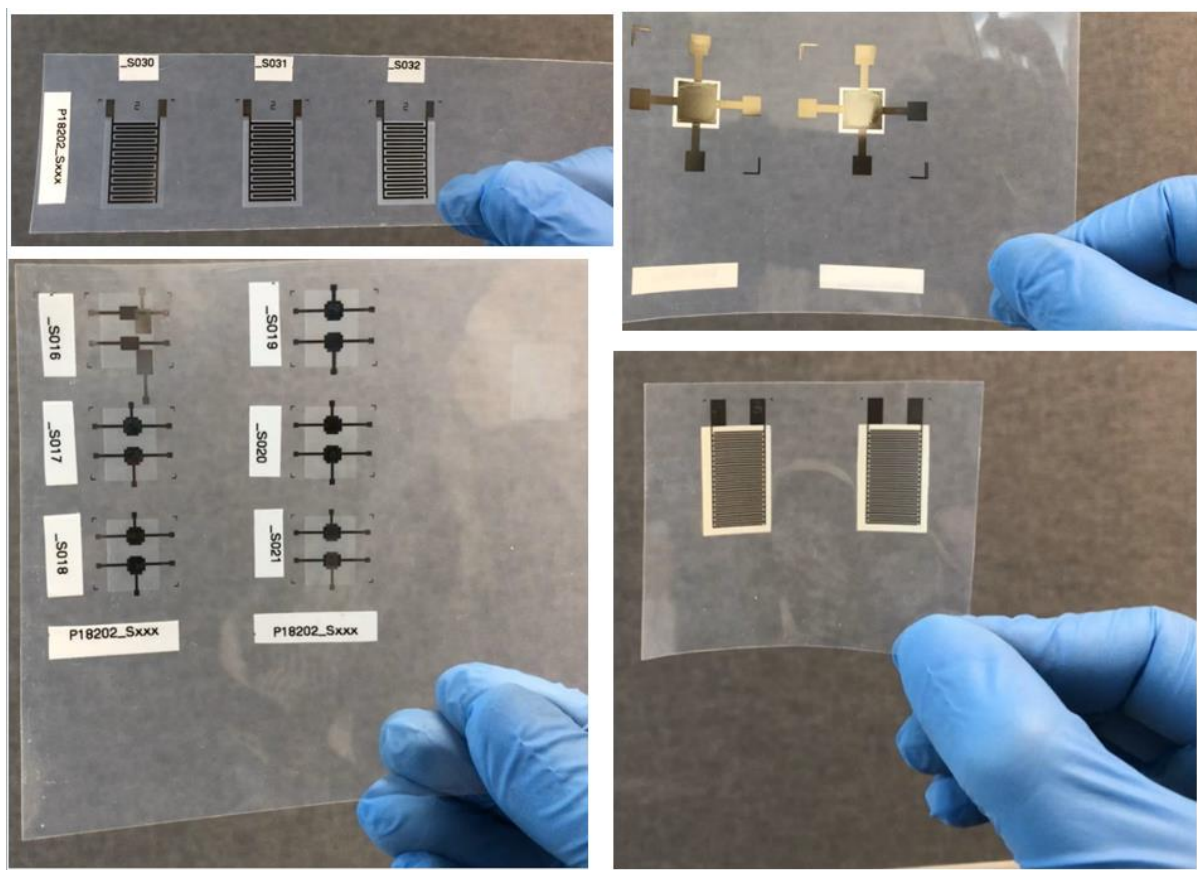
Diagram procesu InkJet tisku



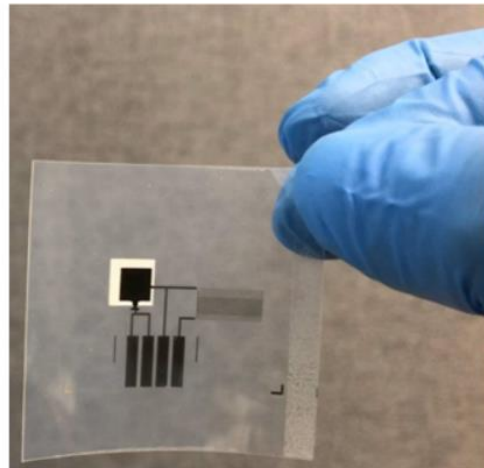
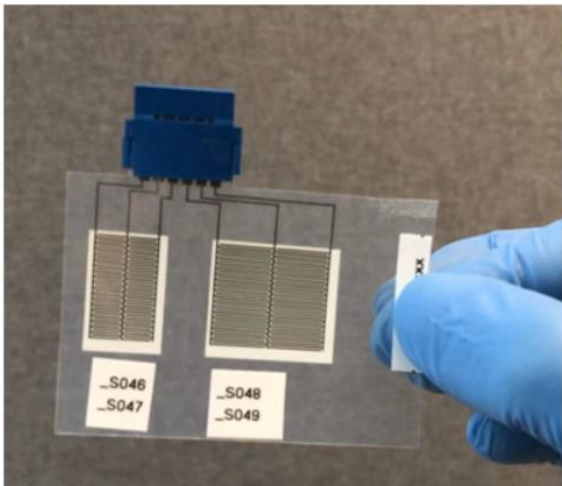
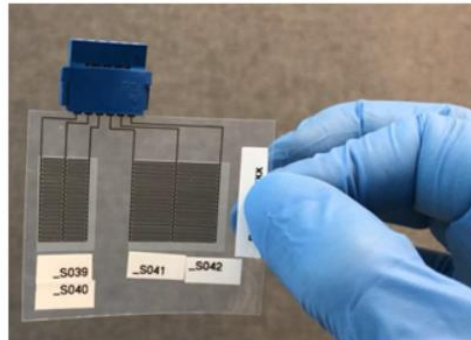
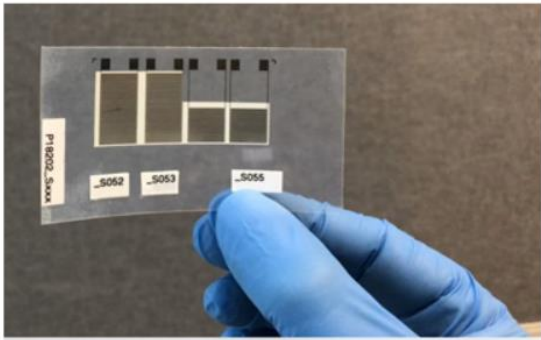
Ukázky realizovaných struktur



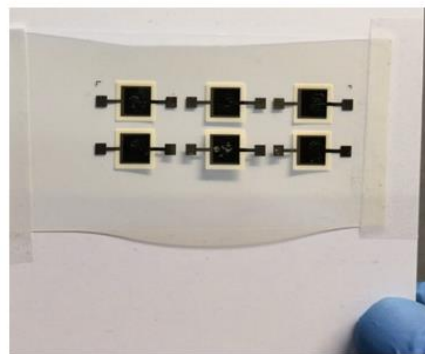
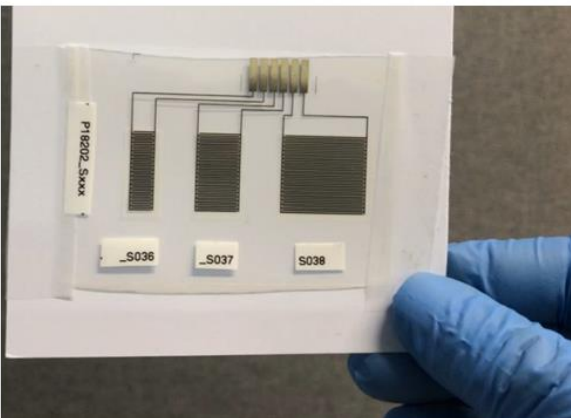
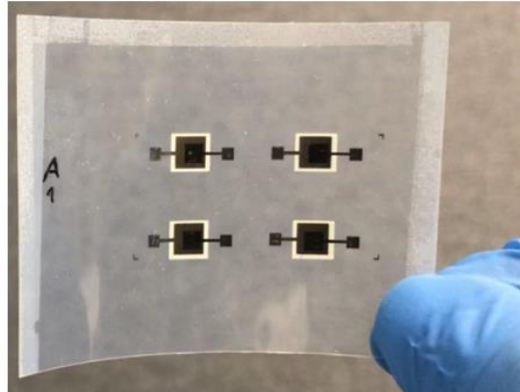
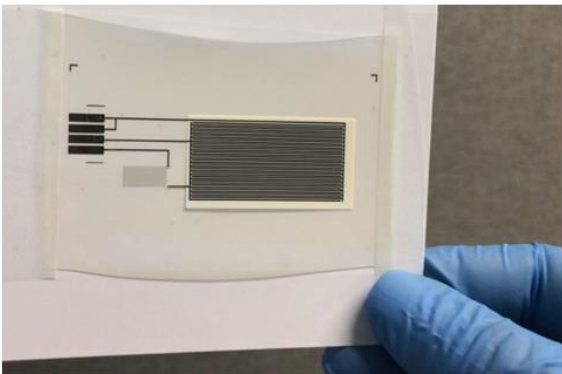
Obrázek 1 Interdigitální kondenzátory se vzduchovým dielektrikem, sada 1



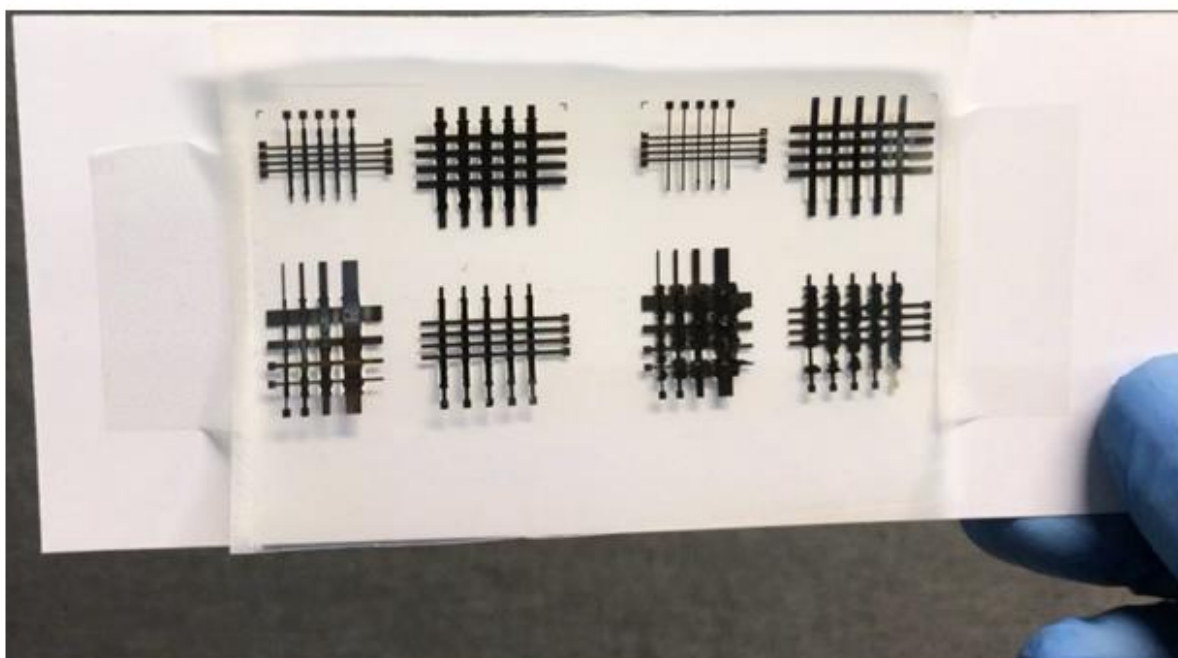
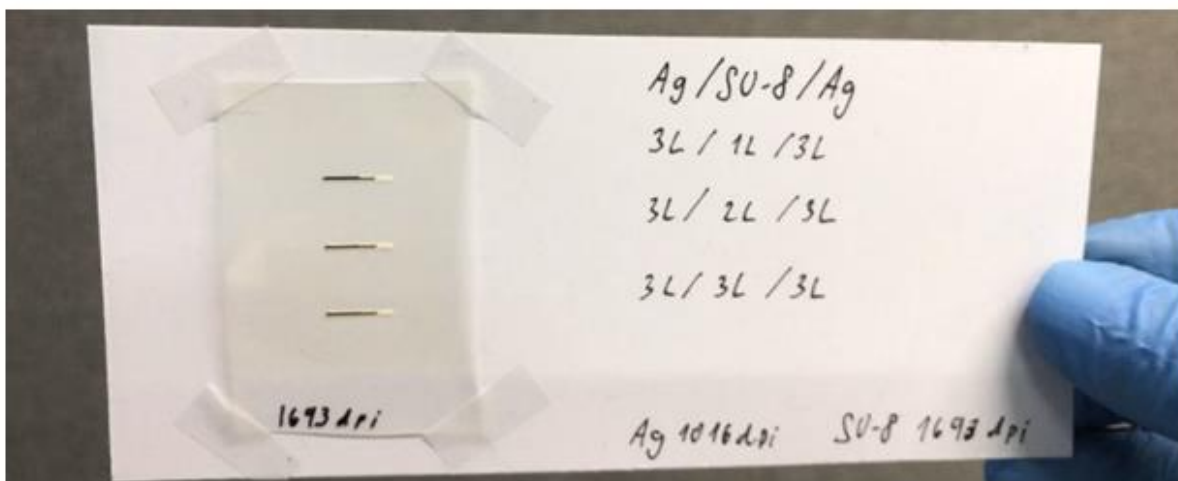
Obrázek 2 Interdigitální a deskové kondenzátory s dielektrikem SU-8 a c-PVP



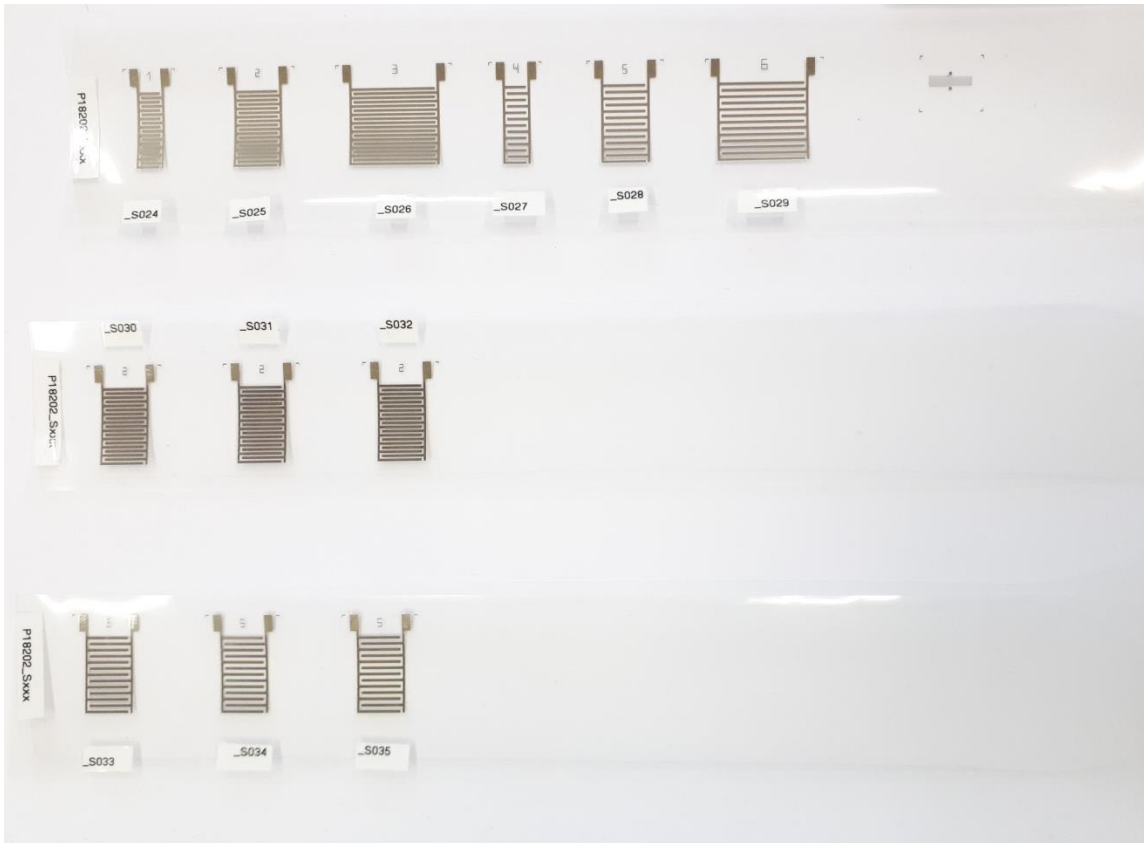
Obrázek 3 RC články s deskovým kondenzátorem a interdigitální kondenzátory s dielektrikem SU-8 a c-PVP včetně konektoru



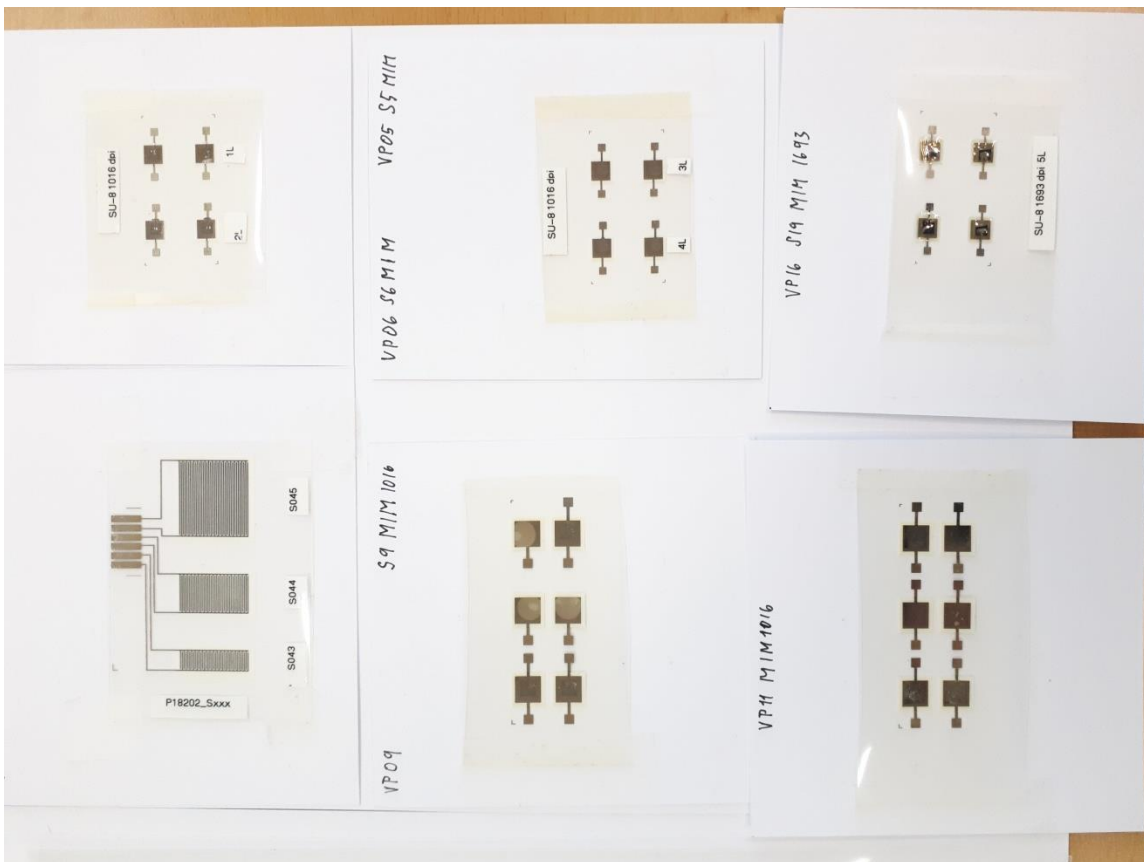
Obrázek 4 RC články s interdigitálním kondenzátorem s dielektrikem SU-8 a deskové kondenzátory s SU-8



Obrázek 5 Motiv pro měření tloušťky vrstvy pomocí SEM a motiv křížení vrstev



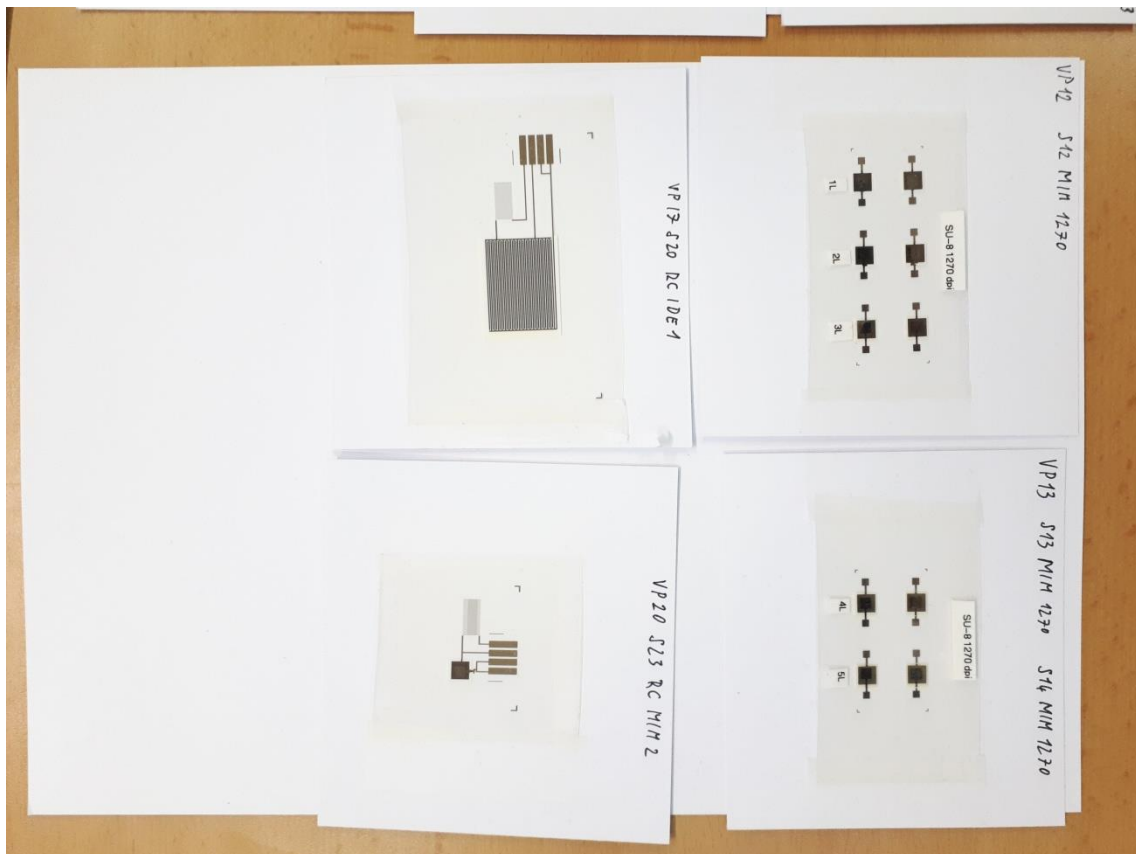
Obrázek 6 Interdigitální kondenzátory, PET



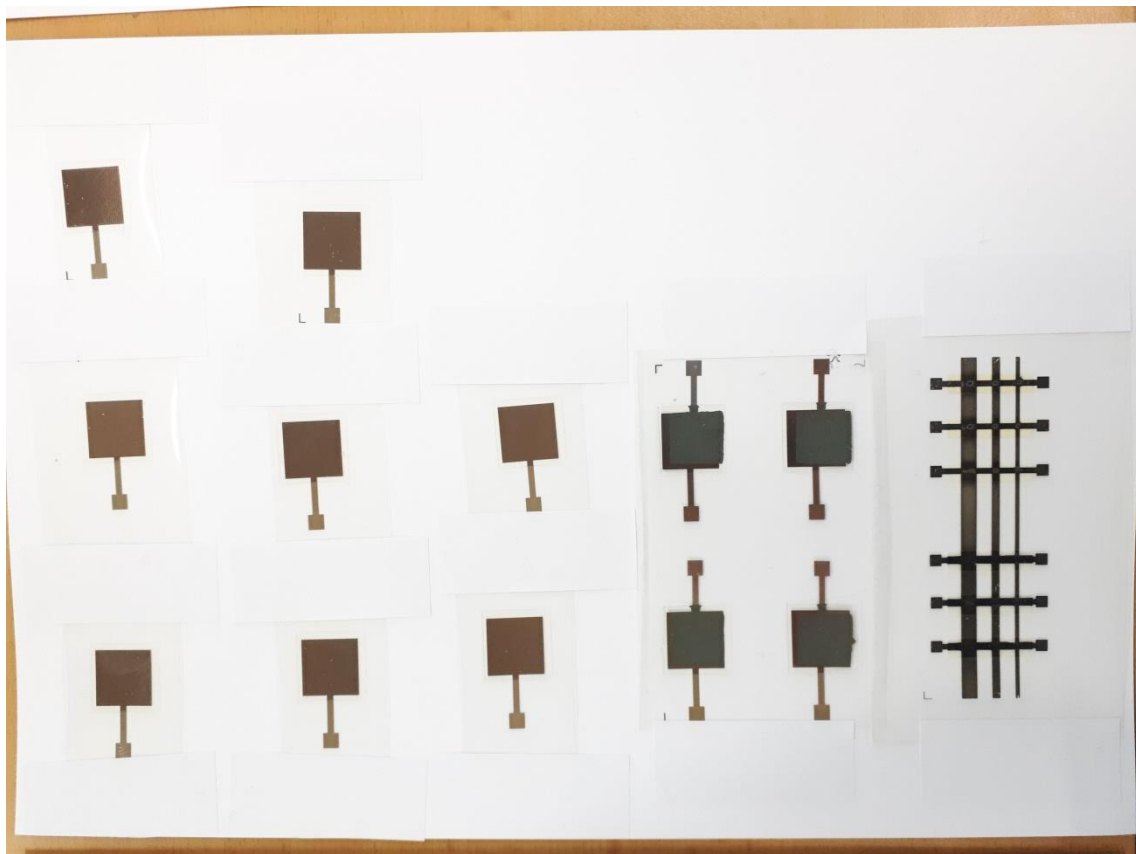
Obrázek 7 Interdigitální a deskové kondenzátory tištěné na PET folii



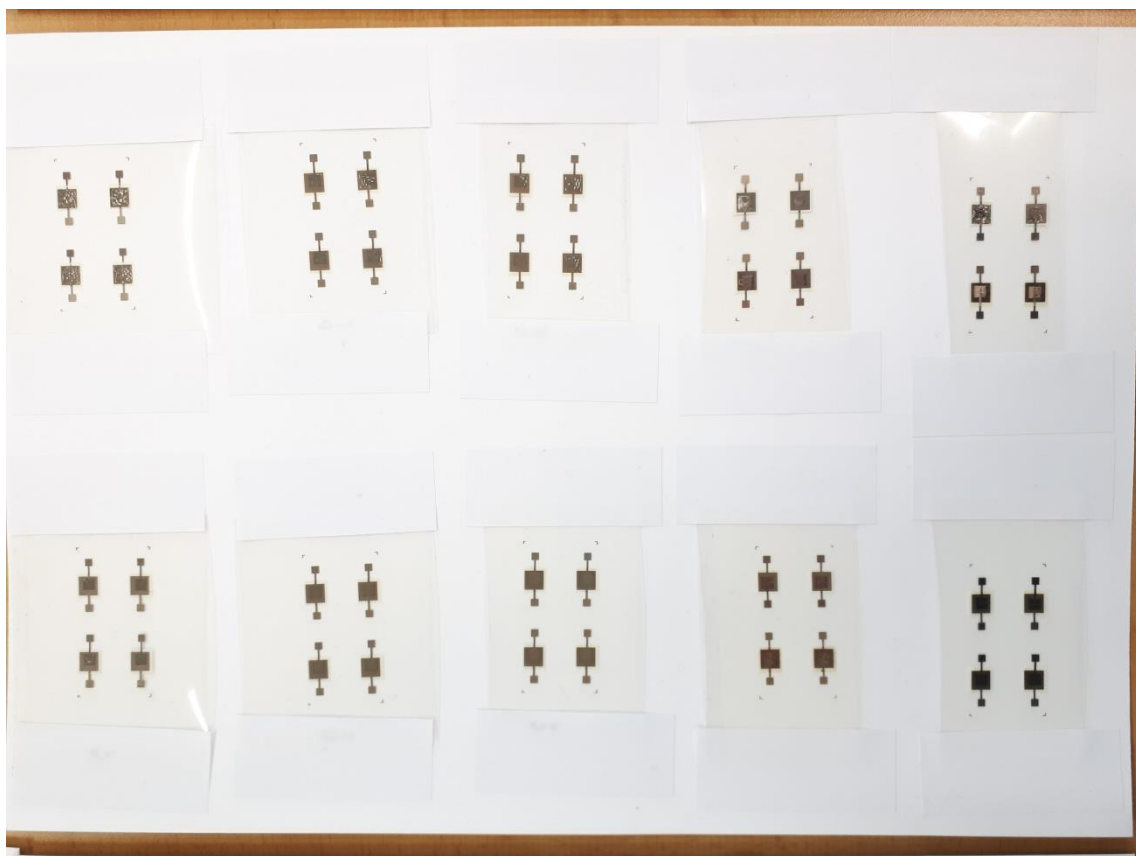
Obrázek 8 Interdigitální a deskové kondenzátory tištěné na PET folii



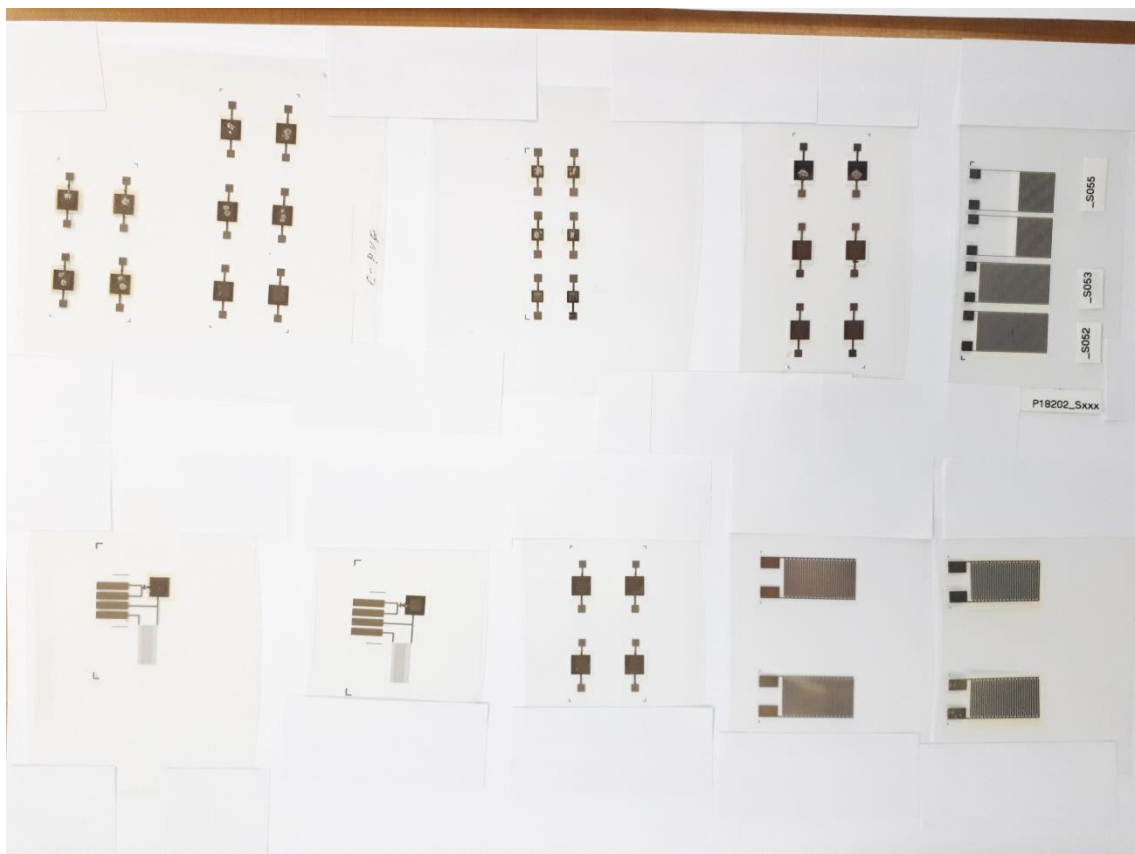
Obrázek 9 Deskové kondenzátory a RC články s deskovým a interdigitálním kondenzátorem



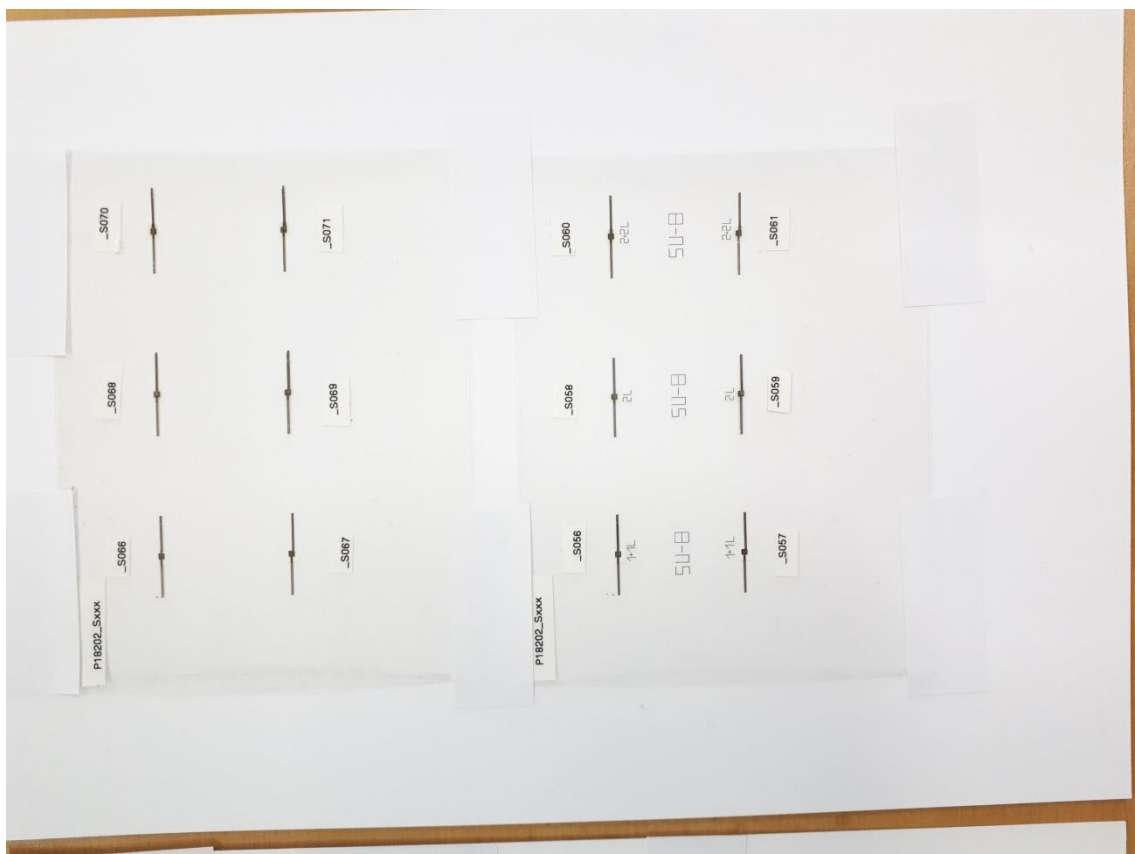
Obrázek 10 Spodní elektroda deskových kondenzátorů s délkou hrany 15 mm a křížení cest



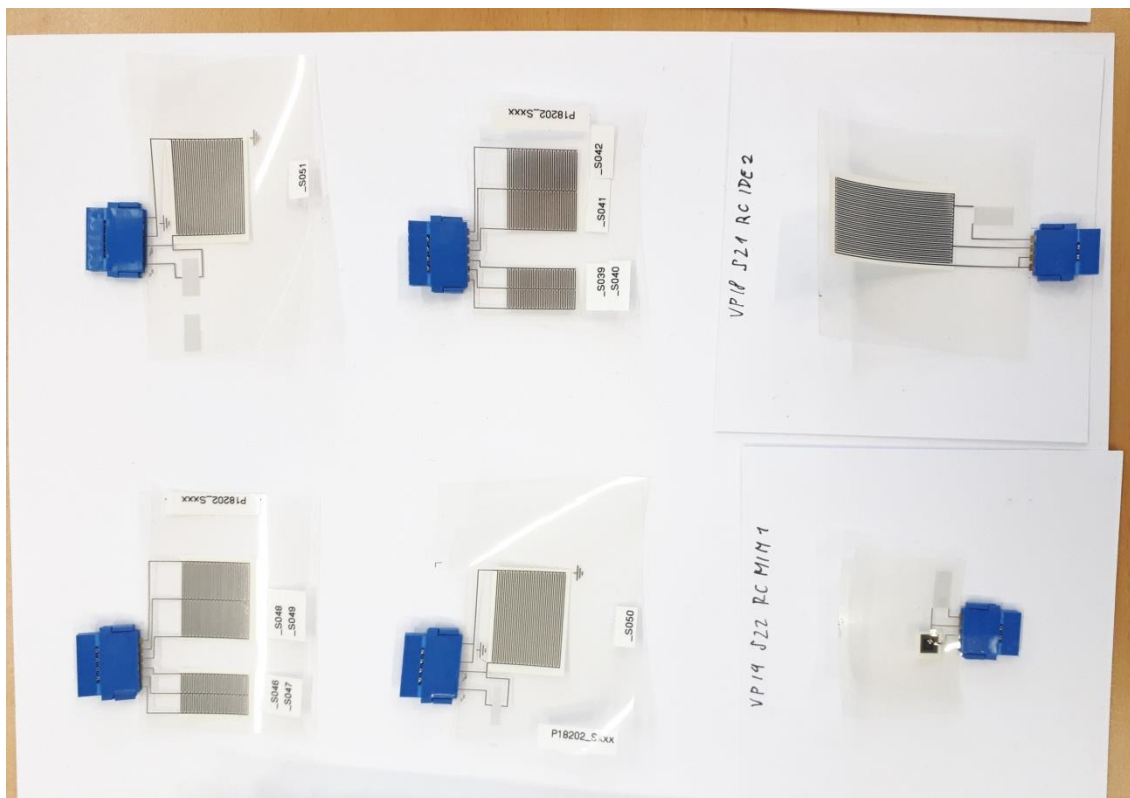
Obrázek 11 Deskové kondenzátory tištěné na PET folii



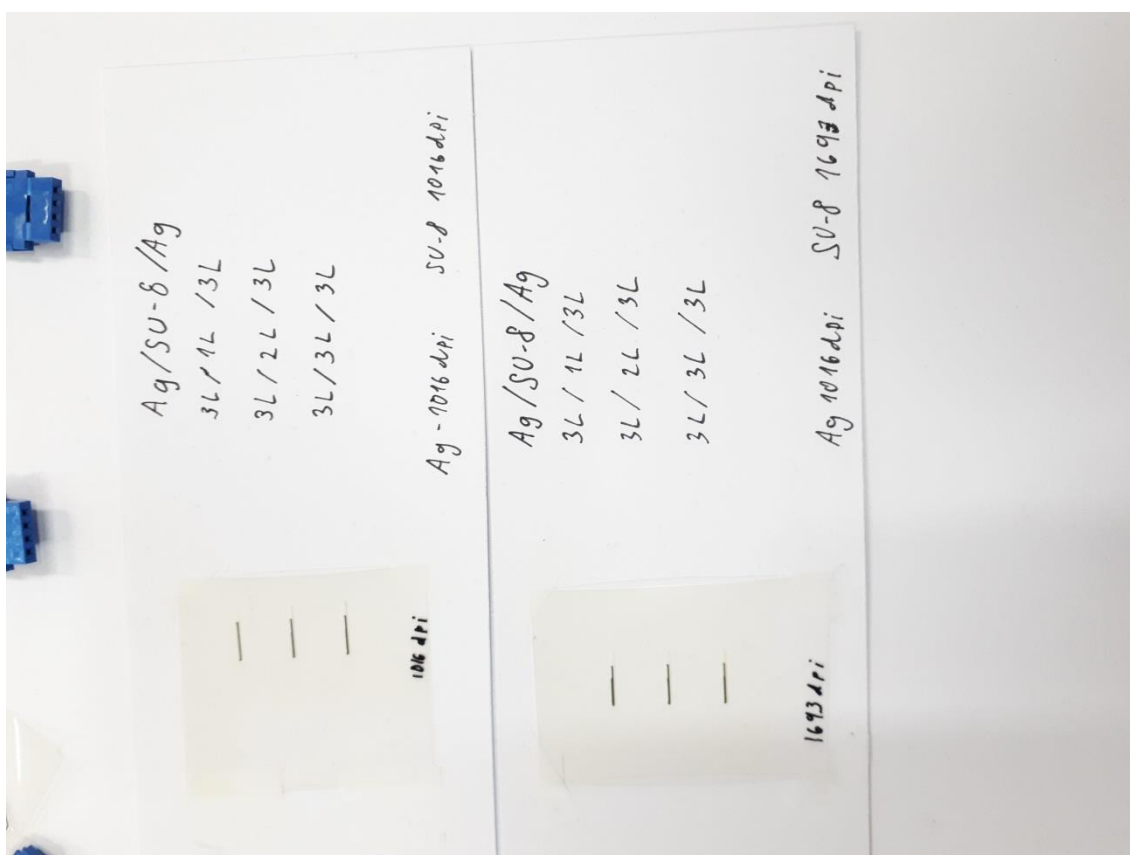
Obrázek 12 Deskové a interdigitální kondenzátory a RC články s interdigitálními kondenzátory



Obrázek 13 Deskové kondenzátory s plochou elektrod 2 x 2 mm



Obrázek 14 Interdigitální kondenzátory a RC články osazené do konektorů



Obrázek 15 Struktury připravené pro měření na rastrovacím elektronovém mikroskopu