

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Tištěné elektronické struktury

Radek Sochor

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Voves, CSc.
Květen 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sochor** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **465971**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tištěné elektronické struktury

Název bakalářské práce anglicky:

Printed Electronic Structures

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou materiálového tisku vodivých, polovodivých a izolačních vrstev.
2. Zvolte vhodné materiály pro přípravu tištěného tranzistoru MOS a optimalizujte metodu jejich tisku.
3. Charakterizujte elektrické vlastnosti připraveného tranzistoru MOSFET a zhodnoťte dosažené výsledky .

Seznam doporučené literatury:

H.L. Gomes et al.: All-inkjet printed organic transistors: Dielectric surface passivation techniques for improved operational stability and lifetime, *Microelectronics Reliability*, vol. 55, pp. 1192–1195, 2015
H. Shin et al.: Low-temperature solution-processed zinc oxide field effect transistor by blending zinc hydroxide and zinc oxide nanoparticle in aqueous solutions, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 57, p. 05GD04, 2018
Y. N. Liang et al.: Effects of the morphology of inkjet printed zinc oxide (ZnO) on thin film transistor performance and seeded ZnO nanorod growth, *Thin Solid Films*, vol. 544, pp. 509–514, 2013
E. Sowade et al.: All-inkjet-printed thin-film transistors: manufacturing process reliability by root cause analysis, *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 33490, 2016.
W. Zapka, Ed., *Handbook of Industrial Inkjet Printing*, 2017, ISBN 9783527687169, <http://dx.doi.org/10.1002/9783527687169>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. RNDr. Jan Voves, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

doc. RNDr. Jan Voves, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu doc. Janu Vovesovi za velmi cenné rady, pomoc s touto prací a za možnost pracovat na zajímavém tématu. Dále velké díky patří Ing. Alexandru Laposovi za pomoc v laboratoři s přípravou vzorků a za velmi přínosné připomínky, které velmi pomohly.

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.

V Praze, 24. května 2019.

Abstrakt

V této práci se zabývám shrnutím technologií tisku elektronických struktur a tisku vzorků tranzistoru. První část je věnována možnostem tisku elektroniky. Detailně se zabývám inkjet tiskem, kterým jsou následně implementovány tranzistory. V druhé části se věnuji strukturám TFT a charakterizaci vrstvy ZnO použité jako polovodičový kanál tranzistoru. Dále jsou zde uvedeny naměřené výstupní charakteristiky tranzistoru a v závěru následně shrnuty výsledky.

Klíčová slova: tištěná elektronika, TFT, ZnO, inkjet

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Voves, CSc.
Technická 1902/2
166 27 Praha 6

Abstract

Main focus of this work is a summary of printed electronic structures and printing of transistor samples. In the first section I am describing options of printing techniques for electronics. Main part is about inkjet printing, which is then used to implement samples of transistor. In the second section are described structures of TFT and characterization of ZnO. Zinc oxide is used as a semiconducting channel of transistor. At last there are placed output characteristics of the the transistor and in conclusion are discussed results.

Keywords: printed electronics, TFT, ZnO, inkjet, solution based

Title translation: Printed electronic structures

Obsah

Seznam zkratk	1
1 Úvod	3
2 Tištěná elektronika	5
2.1 Princip tisku	5
2.1.1 Spin coating	5
2.1.2 Dip coating	6
2.1.3 Doctor blade	6
2.1.4 Slot casting	7
2.1.5 Screen printing	7
2.2 Inkjet printing	7
2.2.1 Piezoelektrické trysky	8
2.3 Materiály pro tisk	9
2.3.1 Vodivé inkousty	9
2.3.2 Polovodičové inkousty	10
2.3.3 Dielektrické inkousty	10
2.4 Substráty pro tisk	10
2.5 Výhody a nevýhody tištěné elektroniky	12
2.6 Technologie dostupná na ČVUT FEL	13
2.6.1 Inkjet tiskárna	13
2.6.2 Měřicí stanice	15
3 Výroba a charakterizace tranzistoru	17
3.1 Výběr materiálů	17
3.2 Struktura vzorků	20
3.3 Výroba vzorků	21
3.4 Naměřená data	22
4 Závěr	27
Literatura	29
5 Přílohy	33
Seznam příloh	33
Přílohy	33

Obrázky

2.1 Metody tisku tištěných struktur. Převzato z [2].....	5	3.9 Výstupní charakteristika pro nedotovaný inkoust od Sigma-Aldrich	23
2.2 Princip tisku pomocí metody spin coating [3]	6	3.10 Výstupní charakteristika pro dotovaný inkoust od Sigma-Aldrich	23
2.3 Princip tisku pomocí metody doctor blade [5].....	7	3.11 Výstupní charakteristika pro připravený inkoust	23
2.4 Sestava inkjet tiskárny [7].....	7	3.12 Spektrum z Ramanova spektroskopu na 533 nm, vzorek ZnO	24
2.5 Jednotlivé typy trysek (a) termální (b) piezoelektrická [9].....	8	3.13 Spektrum z Ramanova spektroskopu na 633 nm, vzorek ZnO	24
2.6 Tvorba kapky v závislosti na řídícím napětí [9]	8	3.14 Spektrum z Ramanova spektroskopu na 830 nm, vzorek ZnO	25
2.7 Interdigitální ITO substrát dodaný od Ossila [16]	11	3.15 Spektrum z Ramanova spektroskopu na 633 nm, vzorek SiO ₂	25
2.8 Křemíkový substrát s vrstvou SiO ₂ s vytvořenými kontakty.....	11	3.16 3D zobrazení z měření pomocí AFM.....	26
2.9 Křemíkový substrát s vyvedeným kontaktem na substrát, detail elektrod	12	3.17 2D zobrazení z měření pomocí AFM.....	26
2.10 Nanášení materiálů při použití litografie a procesu tištění [7].....	12	5.1 Napařovačka materiálů	34
2.11 Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831	13	5.2 Pec pro žíhání vzorků	34
2.12 Cartridge pro DMP 2831 [18]..	14	5.3 Flowbox	35
2.13 Sestava hrotové stanice a polovodičového analyzátoru	15	5.4 Ultrazvuková čistička.....	35
3.1 Voltampérové charakteristiky jednotlivých druhů inkoustů ZnO, doba žíhání 12h	18	5.5 Sestava AFM.....	35
3.2 Fotografie natisknutých inkoustů, připravený v laboratoři (nahore), dodaný od Sigma-Aldrich (dole) ..	19	5.6 Výstupní charakteristika pro připravený inkoust, 5 μm, 12h žíhání	36
3.3 Top-gate rozložení elektrod	20	5.7 Výstupní charakteristika pro připravený inkoust, 10 μm, 12h žíhání	36
3.4 Bottom-gate rozložení elektrod .	20	5.8 Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, 7.5 μm, 12h žíhání	36
3.5 Vzorek na substrátech od Ossila, top-gate	20	5.9 Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, 20 μm, 12h žíhání	37
3.6 Rozložení elektrod na substrátu, bottom-gate.....	21	5.10 Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, 7.5 μm, 12h žíhání	37
3.7 Tištěné elektrody na křemíkovém substrátu	21	5.11 Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, 20 μm, 12h žíhání	37
3.8 Detail na jednotlivé vzorky pro různé inkousty: připravený v laboratoři (nahore), Sigma-Aldrich nedotovaný (uprostřed), Sigma-Aldrich dotovaný Al (dole) .	22		

5.12 Převodní charakteristika pro připravený inkoust, 15 μm , 12h žihání	38
5.13 Převodní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, 7.5 μm , 12h žihání	38
5.14 Převodní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, 7.5 μm , 12h žihání	38

Tabulky

2.1 Porovnání vlastností tisknutelných vodičů [11], upraveno	9
2.2 Vlastnosti vybraných substrátů převzato z [11], upraveno	11
2.3 Porovnání vlastností tisku s litografií, převzato z [7], [17]	13
3.1 Vybrané vlastnosti ZnO, převzato z [20]	17
3.2 Hodnoty odporů vrstev v závislosti na čase žihání, měřeno na 15um ..	19
3.3 Hodnoty Ramanova posunu pro ZnO převzato z [23]	25



Seznam zkratek

- UV - ultrafialový
- LED - light emitting diode
- VF - vysokofrekvenční
- ITO - indium tin oxide
- SMU - source/monitor unit
- VSU - voltage source unit
- VMU - voltage measurement unit
- AFM - atomic force microscopy
- TFT - thin foil tranzistor



Kapitola 1

Úvod

Tisk byl původně vyvinut pro velkou produkci textů a grafiky. Velký posun v technologii tisku vede k sofistikovaným tiskovým sestavám pro nanášení různých materiálů. Tištěné elektronické struktury se v poslední době dostávají do popředí ve výrobě elektroniky. Hlavním důvodem je nízká cena výroby a rychlost přípravy vzorků. V této práci se budu věnovat hlavně shrnutí všech výhod a nevýhod tištěných struktur. Také popíšu jednotlivé typy metod tisku se zaměřením na inkjet printing. V praktické části práce se budu zabývat výrobou unipolárního tranzistoru s polykrystalickým kanálem. Pro výrobu vodivého kanálu jsem použil oxid zinku (ZnO). Podle [1] je oxid zinku přímý polovodič s širokou zakázanou oblastí ($E_g=3.37\text{eV}$), a proto je vhodný kandidát pro výrobu UV LED, laserů a transparentních tranzistorů. Cílem této práce je popis technologií tisku elektronických struktur a jejich následná implementace v podobě tranzistoru.

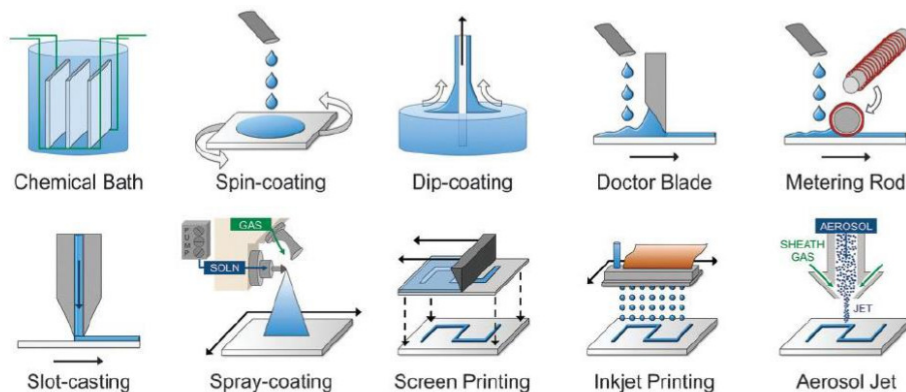
Kapitola 2

Tištěná elektronika

Hlavním cílem dnešního vývoje elektroniky je velká rychlost a co největší ekonomika výroby. Dnes konvenční výrobu, založenou na křemíku, nelze použít pro aplikace, kde se požaduje např. transparentní nebo ohebná elektronika. Další nevýhodou je velice nákladná výroba pomocí fotolitografie. Tento problém lze vyřešit např. použitím jiných materiálů. Pro tento vývoj je vhodný materiálový tisk. Výhodou je vysoká rychlost při vývoji a možnost tisku na ohebné substráty.

2.1 Princip tisku

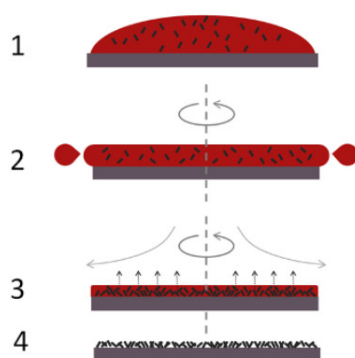
V této sekci popíšu možnosti výroby vzorků pomocí tisku. Jsou zde zmíněny vlastnosti vybraných metod pro porovnání. Mezi hlavní rozdíly se řadí rychlost tisku a nejmenší dosažitelná šířka tištěné čáry. Možné metody jsou zobrazeny na Obr.2.1.



Obrázek 2.1: Metody tisku tištěných struktur. Převzato z [2].

2.1.1 Spin coating

Tato metoda tisku se používá při nanášení tenkých vrstev materiálu na celou plochu substrátu. Spočívá v nanesení kapky na otáčející se substrát, kde kapka vlivem odstředivých sil vytvoří homogenní vrstvu materiálu. Podmínkou



Obrázek 2.2: Princip tisku pomocí metody spin coating [3]

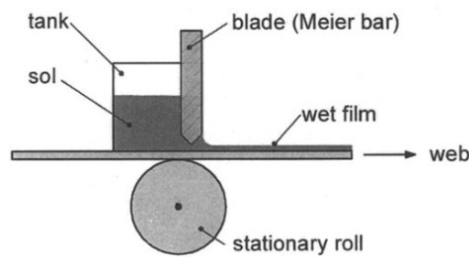
pro vytvoření homogenní vrstvy je správná rychlost otáčení optimalizovaná pro daný inkoust, viz Obr.2.2. Nejčastěji se touto metodou nanáší fotorezistivní materiály pro následné vytvrzení ve fotolitografu. Mezi výhody patří možnost nanesení tenkých a dobře definovaných vrstev. Nevýhodou je velká spotřeba inkoustu, kde se většina odplaví ze substrátu vlivem odstředivých sil. Převzato z [3] a následně upraveno.

■ 2.1.2 Dip coating

Dip coating využívá při tisku povrchového napětí pro udržení materiálu na substrátu. Tento proces začíná namočením substrátu do inkoustu a postupným vytahováním. Následným žiháním se docílí tenké vrstvy materiálu na povrchu. Tloušťku vrstvy lze regulovat rychlostí vytahování a množstvím rozpouštědla v inkoustu. Tuto metodu lze použít pro roll to roll tisk. Jedná se o rychlou metodu tisku s malými ztrátami inkoustu. Nevýhodou je nutnost dodržet vysokou čistotu substrátu, protože celý substrát je ponořen do inkoustu a nečistoty v inkoustu by snižovaly kvalitu vrstvy [4].

■ 2.1.3 Doctor blade

Metoda doctor blade se používá převážně pro roll to roll tisk. Na substrát se nanáší kapky inkoustu a následně jsou pomocí přesně definované mezery upraveny na požadovanou tloušťku, viz Obr.2.3. Tato metoda je opět velice neekonomická, kvůli velkým ztrátám inkoustu. Další nevýhodou je nanášení pouze souvislé vrstvy materiálu bez možnosti úpravy vzoru. Výhodou této metody je velice rychlá úprava a možnost tisknout velké plochy [5].



Obrázek 2.3: Princip tisku pomocí metody doctor blade [5]

2.1.4 Slot casting

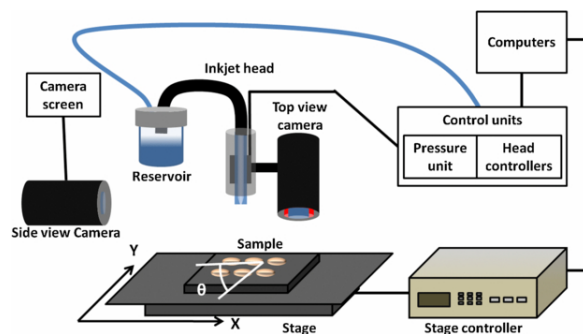
Slot casting je velice podobná metoda jako doctor blade. Jediným rozdílem je, že se vrstva materiálu se nanáší přímo tryskou. Tato tryska upravuje tloušťku vrstvy tím, že mění výšku nad substrátem. Stejně jako doctor blade je výhodou tisk roll to roll a rychlý tisk na velké plochy. Mezi nevýhody se opět řadí nanášení pouze souvislých vrstev materiálu [5].

2.1.5 Screen printing

Screen printing je založen na nanášení vrstev přes masku s motivem, který chceme natisknout. Nad substrát se umístí maska a na ní se vytvoří vrstva inkoustu. Podobnou technikou, jako doctor blade, je následně odstraněn přebytečný inkoust na masce. Nevýhodou této metody je nutnost výroby přesné masky jinou metodou. Výhodou je rychlý tisk definovaných struktur s možností úpravy výsledného motivu [6].

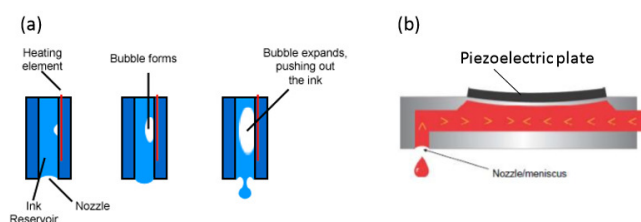
2.2 Inkjet printing

Pro samostatnou sekci jsem vybral inkjet printing, protože tato metoda tisku je využita v mé práci při tisku tranzistoru. Konkrétně jsem využil tiskárnu s piezoelektricky buzenými tryskami. Více informací o použité tiskárně naleznete v sekci 2.6. Inkjet printing je technika, kde se jsou kapky nanášeny na požádání v určitém místě. Celá sestava tiskárny je velice jednoduchá (Obr.2.4).



Obrázek 2.4: Sestava inkjet tiskárny [7]

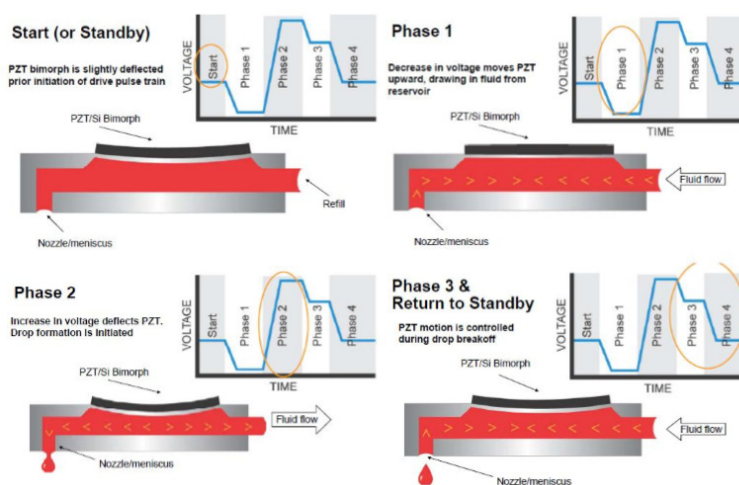
Pro správnou funkčnost systému jsou potřeba dvě kamery. Jedna pro snímání polohy tisku a druhá slouží k měření a pozorování tvorby kapek v tryskách. Řídící jednotky tiskárny se musí starat o pohyb motorizovaného stolku a tiskové hlavy. Dále o teplotu inkoustu i stolku. Inkousty jsou ve formě koloidního nebo chemického roztoku a jsou uloženy v natlakovaném zásobníku. Tisk inkoustu probíhá přes řadově mikrometry velké trysky. Mezi nejvíce používané metody tvorby kapek se řadí termální (Obr.2.5 (a)), piezoelektrická (Obr. 2.5 (b)) a elektrohydrodynamická. Kapky malých objemů (1-100 pL) jsou vystřelovány pulsem, generovaným termálními nebo piezoelektrickými aktuátory. Převzato z [7] a [8]. Dále se budu věnovat více piezoelektrickým aktuátorům, protože jsou poté použity v práci pro tisk vzorků.



Obrázek 2.5: Jednotlivé typy trysek (a) termální (b) piezoelektrická [9]

2.2.1 Piezoelektrické trysky

Jednou z nejdůležitějších součástí tiskárny jsou trysky. Pro správný tisk je nutno dodržet stejný objem vygenerované kapky a taky její tvar. Objem i tvar kapky je tvořen piezoelektrickou vrstvou uvnitř trysky. Tato vrstva je řízena elektrickým napětím, které zajišťuje ohýbání součástky, a tím vytlačuje inkoust ven. Použitý tvar napěťového pulsu poté určuje objem a tvar dané kapky [10]. Tvar tohoto pulsu je nutno nastavovat pro každý inkoust kvůli jejich rozdílnému chování v trysce. Průběh tvorby kapky je zobrazen na Obr.2.6.



Obrázek 2.6: Tvorba kapky v závislosti na řídicím napětí [9]

Jednotlivé úpravy na tvaru napěťového pulsu se provádí při pohledu kamerou, která měří rychlost, velikost a pád po svislé trajektorii jednotlivých kapek. Nesprávné nastavení může způsobit generaci více kapek za jeden cyklus nebo příliš velkou rychlost, která vede k většímu roztékání inkoustu po dopadu. U systémů s více tryskami je nutné dodržet stejnou rychlost kapek na jednotlivých tryskách, aby se předešlo chybě v umístění kapek vedle sebe.

2.3 Materiály pro tisk

Jednou z nejdůležitějších částí tištěné elektroniky je výběr materiálů. Mezi obecně požadované vlastnosti řadíme jejich časovou stálost, ohebnost, průhlednost, nejmenší tisknutelnou tloušťku čáry a mnoho dalších. Tuto část jsem rozdělil do třech hlavních: vodivé, polovodičové a dielektrické inkousty. Každý z těchto typů inkoustů je nutnou podmínkou pro vytvoření funkčního elektronického systému.

2.3.1 Vodivé inkousty

Pro tisk vodičů se používají různé materiály založené na kovech jako Ag, Cu, Au nebo na organických látkách jako PEDOT/PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiopene); poly(styrenesulfonate)). Dále na keramice, kam patří oxidy a uhlíkové nanomateriály. Jejich hlavní požadovanou vlastností je vysoká vodivost, proto první volbou jsou často kovové inkousty. Porovnání jednotlivých typů inkoustů naleznete v 2.1. Avšak další z parametrů může být průhlednost nebo teplota žíhání, kde se již uplatňují organické a keramické materiály.

Materiály		Elektrická vodivost (S/cm)
Kovy	Ag	6.2×10^5
	Cu	5.9×10^5
	Au	4.4×10^5
	Pt	1.0×10^5
	Ni	1.4×10^5
Organické sloučeniny	PEDOT/PSS	$1-10^3$
Keramika	ITO	10^3-10^4
	CNT	$\sim 10^4$
	Graphen	2×10^5

Tabulka 2.1: Porovnání vlastností tisknutelných vodičů [11], upraveno

Na katedře se pro tisk vodivých cest používá stříbrný inkoust (nanoparticle, 30-35 wt. % in triethylene glycol monomethyl ether, spec. resistivity $11 \mu\Omega\text{-cm}$) od firmy ANP zakoupený v SigmaAldrich. Více informací o tomto inkoustu naleznete v [12].

2.3.2 Polovodičové inkousty

Polovodičové inkousty jsou důležitou součástí elektronických struktur. Jejich hlavní použití je v aktivních prvcích jako jsou tranzistory, LED, fotovoltaické panely atd. Mezi hlavní vlastnosti patří pohyblivost nosičů, majoritní typ vodivosti (N, nebo P), prahové napětí.

Pro tisk na inkjet tiskárnách se používají nejčastěji komerční polovodičové vrstvy, založené na organických polovodičích. V této práci jsem pro polovodičovou vrstvu použil oxid zinku ZnO. Jeho výhodou je vysoká transparentnost, a proto je možné ho použít pro tisk kompletně transparentní elektroniky. Další výhodou je citlivost na UV záření. Tato vlastnost se dá využít v senzorech či komunikaci. Pro výrobu kanálu tranzistoru jsem použil 2 druhy inkoustu. Jeden s dotací Al (crystalline Al doped ZnO (3.15 mol% Al) in 2-propanol and propylene glycol) a druhý bez dotace (crystalline ZnO in isopropanol and propylene glycol). Informace o těchto inkoustech naleznete v [13],[14]. Porovnání vlastností obou druhů inkoustů naleznete v 3. Jednou z dalších možností je použití vlastního inkoustu připraveného podle následujícího postupu. Roztok oxidu zinku připravíme rozpuštěním 2g zink acetate dehydrate (96459, Sigma-Aldrich) v 20ml 99,8% ethanolu (20025-U99, Lach-Ner) a 0.5ml diethanomaminu (D8885, Sigma-Aldrich), který působí jako stabilizátor. Výsledný roztok je poté magneticky míchán při 60°C jednu hodinu, tak aby vytvořil transparentní a homogenní směs. Před depozicí je nutno ponechat roztok 24h odstát.

2.3.3 Dielektrické inkousty

Dalším typem vodivosti jsou dielektrické materiály, jejichž hlavním úkolem je izolace jednotlivých komponent, jako jsou například elektrody kondenzátoru nebo hradlové elektrody tranzistoru. Další zajímavou aplikací dielektrika mohou být optická přizpůsobení součástek nebo dielektrické prvky pro VF aplikace. Při přípravě vzorků jsem použil dva typy dielektrických inkoustů. Prvním je komerční dielektrikum PriElex[®] SU-8 informace naleznete na [15]. Druhou možností je využití c-PVP (Cross-linked poly-4-vinylphenol) připraveného v laboratoři podle následujícího postupu. Poly-4-vinylphenol (PVP) rozpustíme v 10ml propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA, 484431 Sigma-Aldrich) a mícháme 3h na magnetické míchačce za pokojové teploty. Poté přidáme Poly(melanine-co-formaldehyde) methylated (PMFM, Sigma-Aldrich, average Mn 432, 84 wt.% in 1-butanol) a dále mícháme 12h. Roztok je namíchan tak, aby obsahoval 10 wt% PVP a 2 wt% PMFM rozpuštěného v PGMEA. Před depozicí se roztok naředí PGMEA v poměru 1:1. Následně je přefiltrován přes 0.2 μ m filtr pro odstranění nečistot a nerozpustných zbytků.

2.4 Substráty pro tisk

Substráty jsou další nezbytnou součástí při tisku elektronických struktur. Mezi hlavní požadované vlastnosti se řadí: typ vodivosti (N,P,dielektrikum),

ohybnost, průhlednost, povrchové nerovnosti, odolnost vůči teplu a nízká cena. Porovnání jednotlivých parametrů nejčastěji používaných substrátů naleznete níže v Tab.2.2.

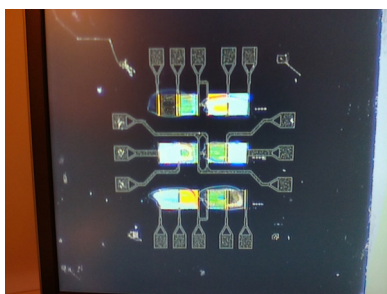
	Tloušťka (μm)	Hustota (g/cm^2)	Transparentnost (%)	Maximální teplota ($^{\circ}\text{C}$)
PET	16-100	1.4	90	120
PEN	12-250	1.4	87	155
PI	12-125	1.4	-	300
Glass	50-700	2.5	90	400
Paper	100	0.6-1.0	-	130
Transparentní papír	20-200	1	90	150
Ocel	200	7.9	-	600

Tabulka 2.2: Vlastnosti vybraných substrátů převzato z [11], upraveno

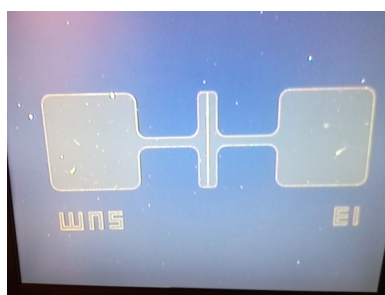
V mé práci jsem dále použil křemíkové substráty vytvořené z degenerovaného polovodiče, viz Obr. 2.8 a Obr.2.9. Tyto substráty vykazují velkou vodivost a jsou zakryté definovanou vrstvou SiO_2 pro vytvoření dielektrické vrstvy. Jeden z použitých substrátů má interdigitální rozložení elektrod s vrstvou ITO jako vodič, viz Obr.2.7.



Obrázek 2.7: Interdigitální ITO substrát dodaný od Ossila [16]



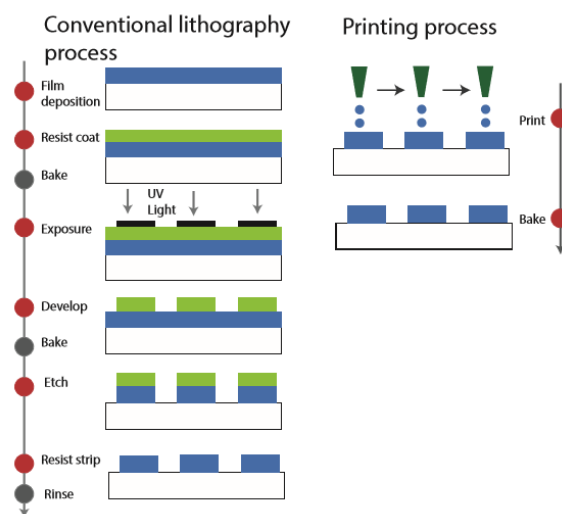
Obrázek 2.8: Křemíkový substrát s vrstvou SiO_2 s vytvořenými kontakty



Obrázek 2.9: Křemíkový substrát s vyvedeným kontaktem na substrát, detail elektrod

2.5 Výhody a nevýhody tištěné elektroniky

Jako každá technologie výroby, tak i tištěná elektronika má své výhody a nevýhody. Jednou z již uvedených výhod je rychlost výroby vzorků, ale je mnoho dalších parametrů, které je nutno uvážit. Rychlost výroby se dá reprezentovat na Obr.2.10, kde lze vidět velký rozdíl v počtu jednotlivých kroků výroby.



Obrázek 2.10: Nanášení materiálů při použití litografie a procesu tištění [7]

Dalším aspektem při výrobě pomocí litografie je nutnost použití vakuové komory, masek pro nanášení vzoru a cesty, jak se zbavit nežádoucích materiálů na vzorku. Toto všechno vede k vyšší ceně výsledného produktu. Tištění nepotřebuje vakuum ani masky pro správnou depozici. Dále není nutno odstraňovat žádné materiály před další depozicí. Všechny tyto faktory se znásobují při produkci velkých sérií na rozsáhlých plochách. Z tohoto hlediska se zdá tištěná elektronika velmi příznivou náhradou za dnes běžně používanou litografii. Avšak, technologie tištění má špatné rozlišení oproti konvenčním metodám. Například, maximální rozlišení při použití inkjet tiskárny je $\sim 20 \mu\text{m}$.

Pokud strukturu připravíme litografií, s rozlišením se dostaneme až o 3 řády níže na desítky nanometrů. Další nevýhodou je špatná spolehlivost tisku v porovnání s litografií [7]. Porovnání jednotlivých metod naleznete v Tab.2.3.

Parametr	Litografie	Tisk
Vakuum	ano	ne
Masky	ano	ne
Cena	vysoká	nízká
Výroba velkých ploch	špatná	dobrá
Procesní teplota	vysoká	nízká
Výběr substrátů	malý	velký
Rozlišení	velké	malé
Spolehlivost	vysoká	nízká
Rychlost vývoje	nízká	vysoká
Počet vadných výrobků	malý	větší

Tabulka 2.3: Porovnání vlastností tisku s litografií, převzato z [7], [17]

2.6 Technologie dostupná na ČVUT FEL

V této části uvádím hlavní použité přístroje při výrobě a charakterizaci vyrobených vzorků. Další vybavení laboratoře, které bylo použito se nachází v příloze.

2.6.1 Inkjet tiskárna

Na fakultě je dostupná tiskárna na principu inkjet printing, viz Obr. 2.11. Tato tiskárna je dodána firmou Fujifilm. Trysky pracují v drop-on-demand režimu s piezoelektrickým buzením. V následující části uvádím vlastnosti tiskárny převzaté z [18].



Obrázek 2.11: Materiálová tiskárna Fujifilm Dimatix DMP 2831

■ Vlastnosti tiskárny:

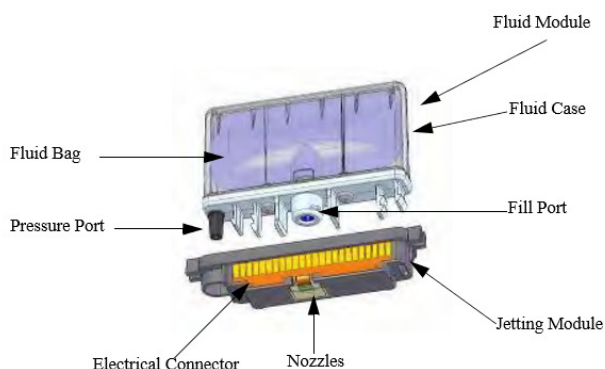
- Výška, šířka, hloubka: 584 mm, 673 mm, 419 mm
- Hmotnost: 43 kg
- Tisknutelná plocha:
 - 210 mm x 315 mm (tloušťka substrátu < 0.5 mm)
 - 210 mm x 260 mm (0.5 mm < tloušťka substrátu < 25 mm)
- Opakovatelnost: $\pm 25 \mu\text{m}$
- Vyhřívání substrátu: max. 60 °C bez chlazení

Součástí tiskárny je také Drop-watch kamera, která umožňuje sledovat průběh tvorby a odkápnutí kapky. Tato kamera slouží hlavně k nastavení piezoelektrických trysek. Dále je zde Fiducial kamera pro sledování natištěného motivu, určení počátku a reálných rozměrů pro tisk.

K tisku a uchovávání jednotlivých materiálů se používají dva typy cartridge (Obr. 2.12) 10 pl a 1 pl, kde označení je nominální objem jedné kapky.

■ Vlastnosti cartridge:

- Trysky: piezoelektrické, 16x s roztečí 254 μm
- Velikost trysky: 21.5 μm pro 10 pl, 9 μm pro 1 pl
- Plnicí objem: 1.5 ml
- Vyhřev cartridge: max. 70 °C



Obrázek 2.12: Cartridge pro DMP 2831 [18]

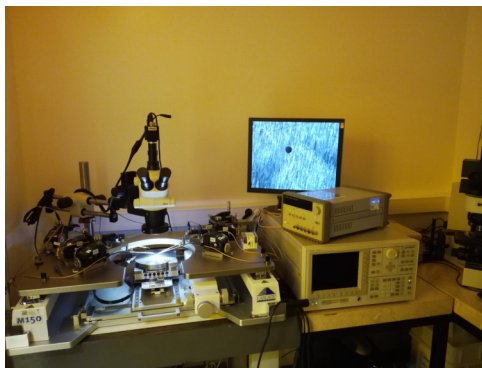
Pro úspěšný tisk je nutné splnit požadované vlastnosti inkoustu podle manuálu. Hlavním parametrem, který musí být splněn je viskozita a povrchové napětí, protože tyto vlastnosti nejvíce ovlivňují tvorbu kapky. Dalším nutným parametrem je udržení velikosti částic inkoustu pod stanovenou hranicí.

■ Požadované vlastnosti inkoustu:

- Dynamická viskozita: 10 - 12 cPs (0.010 – 0.012 Pa·s)
- Povrchové napětí: 28 - 42 dynes/cm (0.028 – 0.042 N/m)
- Maximální velikost částic: 0.2 μm (1:100 velikosti trysek)
- Bod varu: doporučeno $>100\text{ }^\circ\text{C}$
- Hustota: $>1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- pH: 4 – 9

■ 2.6.2 Měřící stanice

Pro měření všech charakteristik byla použita sestava hrotové stanice a polovodičového analyzátoru Agilent 4155C, viz Obr.2.13. Ve výbavě analyzátoru se nachází čtyři jednotky SMU, dvě VMU a dvě VSU. VMU jednotka dokáže měřit s rozlišením $1\text{ }\mu\text{V}$. K dispozici jsou tři možnosti měření: měření rozmítáním, měření vzorků a kvazi-statické C-V měření. Další možností je nárazové měření, kde analyzátor dokáže vynutit požadované proudy po krátkou dobu a sledovat jejich působení. Celý analyzátor je řízen počítačem po sběrnici pomocí GPIB příkazů [19]. Výhodou této měřící sestavy je její propojení s počítačem, kde programem EasyExpert jsou data přímo vyhodnocena.



Obrázek 2.13: Sestava hrotové stanice a polovodičového analyzátoru

Kapitola 3

Výroba a charakterizace tranzistoru

V této kapitole je shrnuta výroba vzorků tranzistoru. Hlavně volba materiálů, struktura vzorků a výsledné charakteristiky tranzistoru. Dalším bodem je kvalita natisknutých vrstev materiálu a fotodokumentace vyrobených vzorků. Pozorované vlastnosti jsou poté shrnuty v závěru práce.

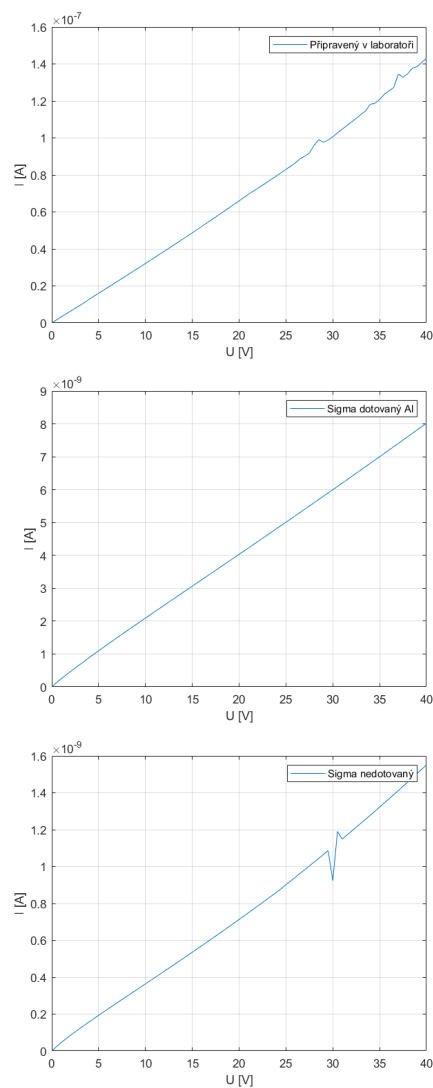
3.1 Výběr materiálů

Jako materiál pro vodivý kanál jsem zvolil oxid zinku, kvůli jeho vlastnostem popsaným v Tab.3.1. Tyto vlastnosti byly použity v [20] jako konstanty pro simulaci. V reálném případě se tyto hodnoty mohou lišit.

Materiálové konstanty pro ZnO	Hodnoty
Zakázaná oblast při 300K, E_g	3.4 eV
Efektivní hmotnost elektronu ve vodivém pásu, m_e	0.318 m_0
Efektivní hmotnost elektronu ve valenčním pásu, m_h	0.5 m_0
Dielektrická konstanta, ϵ_s	8.12
Hallova pohyblivost, μ_H	150 cm^2/Vs
Elektronová afinita, ζ	4.29 eV
Výstupní práce, Φ_S	4.45 eV
Donorová hladina, E_C-E_d	30 meV

Tabulka 3.1: Vybrané vlastnosti ZnO, převzato z [20].

Další důvod proč jsem zvolil ZnO je jeho nízká cena, která by mohla vést k jeho větší využitelnosti v elektronice. Na výběr bylo ze tří možností inkoustů: ZnO inkoust od Sigma-Aldrich, ZnO dotovaný Al od Sigma-Aldrich a ZnO připravený v laboratoři podle postupu výše. Každý z těchto inkoustů tvoří polykrystalickou vrstvu materiálu, kde potenciálová bariéra na jednotlivých zrnech určuje vodivost dané vrstvy [20]. Naměřené voltampérové charakteristiky vzorků naleznete na Obr.3.1. Tyto charakteristiky byly měřeny při stejné době žíhání (12 h) a na stejně vzdálených elektrodách (15 μm).



Obrázek 3.1: Voltampérové charakteristiky jednotlivých druhů inkoustů ZnO, doba žíhání 12h

Dále jsem se věnoval optimalizaci inkoustů pro tisk, kde jsem studoval rozdíly v kvalitě tisku u inkoustu připraveného a dodaného od firmy Sigma-Aldrich. Fotografie z mikroskopu naleznete na Obr. 3.2. Použil jsem fotografie pouze dvou inkoustů: připraveného v laboratoři (nahore) a od Sigma-Aldrich (dole). Při tisku dotované verze ZnO se inkoust choval stejně jako pro ZnO nedotované.



Obrázek 3.2: Fotografie natisknutých inkoustů, připravený v laboratoři (nahore), dodaný od Sigma-Aldrich (dole)

Ze změřených voltampérových charakteristik pro různé doby žíhání jsem odečetl odpory vrstev. Hodnoty jednotlivých odporů naleznete v Tab.3.2. Všechny odpory byly měřeny na elektrodách vzdálených od sebe $15\ \mu\text{m}$ na substrátu z Obr.2.9.

t [h]	2h			12h		
typ	Připravený	Dotovaný	Nedotovaný	Připravený	Dotovaný	Nedotovaný
R [Ω]	$8.12 \cdot 10^8$	$3.88 \cdot 10^{11}$	$2.59 \cdot 10^{12}$	$2.93 \cdot 10^8$	$4.98 \cdot 10^9$	$2.69 \cdot 10^{10}$

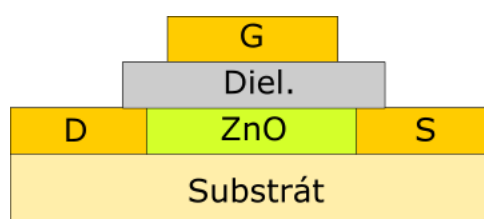
Tabulka 3.2: Hodnoty odporů vrstev v závislosti na čase žíhání, měřeno na $15\ \mu\text{m}$

Pro tisk dielektrických vrstev, bylo použito c-PVP a SU-8. Hlavní rozdíl těchto dielektrických vrstev byl v jejich optimalizaci pro tisk, jako v případě vodivého kanálu. Vrstva c-PVP vykazovala větší homogenitu tisknutých struktur. Největším problémem při tisku těchto vrstev byla jejich nedefinovaná tloušťka. Tloušťku vrstev určuje mnoho faktorů jako je např. viskozita inkoustu, povrchové napětí kapky, čistota substrátu.

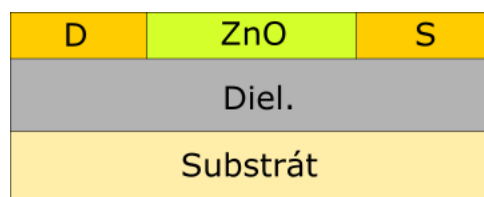
Vodivé cesty byly vyrobeny dvěma způsoby. První byl napaření hliníku v napařovačce (viz přílohy Obr.5.1). Tato metoda byla použita pro hradlové elektrody v top-gate struktuře (Obr. 3.3). Druhá možnost byla tisk stříbrných struktur na tiskárně. Stříbrné vodiče byly použity ve struktuře bottom-gate (Obr. 3.4) pro výrobu drain, source elektrod.

3.2 Struktura vzorků

V této části uvádím použité rozložení elektrod a jejich výhody a nevýhody, jak pro měření tak pro výrobu. V této práci jsem využil dvě možnosti rozložení: top-gate (viz Obr.3.3) a bottom-gate (viz Obr.3.4). Top-gate má hlavní výhodu při měření vzorků, kde všechny elektrody jsou dostupné z jedné strany substrátu. U bottom-gate je nutné nakontaktovat substrát, který slouží jako hradlová elektroda tranzistoru. Existuje několik možností: vyvedený kontakt na substrát přímo z výroby, kontakt přes vodivou pastu na kovový povrch, nebo uložení a nakontaktování vzorku do tzv. chip carrieru. Tyto struktury byly použity např. v [21], [22] a [1].

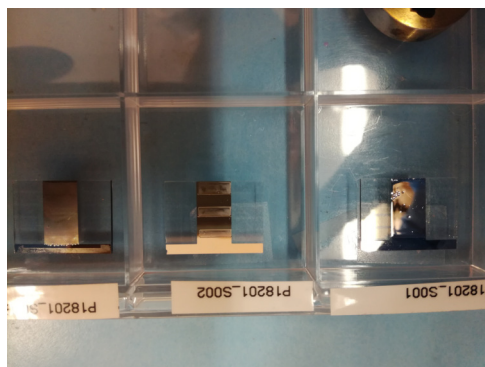


Obrázek 3.3: Top-gate rozložení elektrod

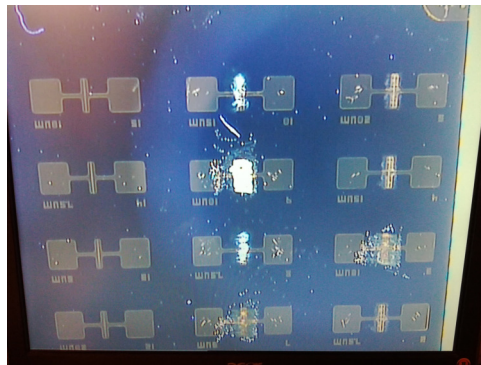


Obrázek 3.4: Bottom-gate rozložení elektrod

Pro již zmíněné substráty v části 2.4 jsem použil oba druhy rozložení elektrod. Pro substrát s interdigitální strukturou bylo použito rozložení top-gate, viz Obr.3.5. Pro dva zbývající křemíkové substráty se použila struktura bottom-gate. viz Obr. 3.6.



Obrázek 3.5: Vzorek na substrátech od Ossila, top-gate

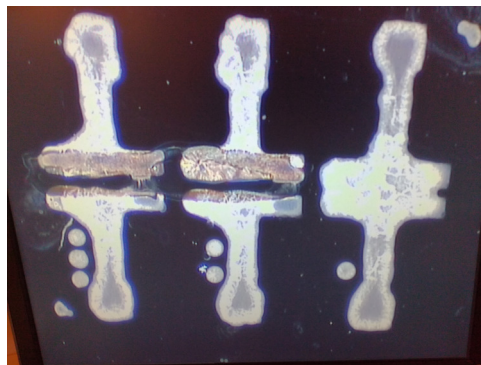


Obrázek 3.6: Rozložení elektrod na substrátu, bottom-gate

3.3 Výroba vzorků

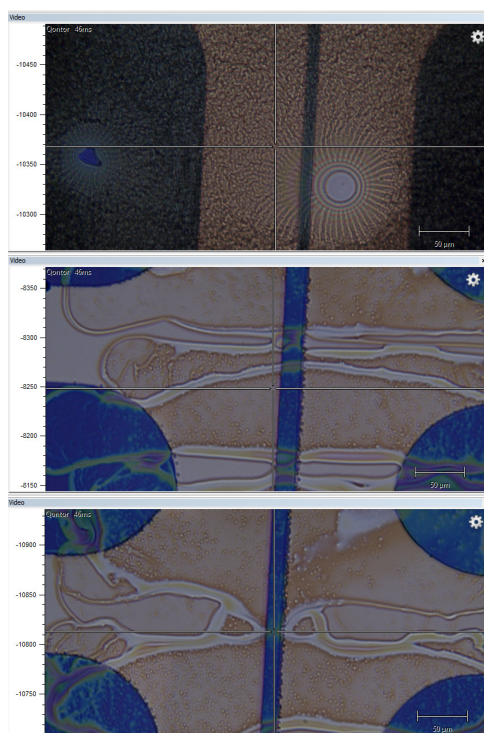
Pro první vzorky jsem použil substrát dodaný od společnosti Ossila. Výroba tohoto vzorku obnášela tisk aktivní vrstvy ZnO, dielektrické vrstvy a napaření hradlové elektrody. Před tiskem byl každý substrát očištěn doporučeným postupem od výrobce. Pro kanál tohoto typu byl zvolen ZnO, připravený v laboratoři podle postupu zmíněném v části 2.3.2. Při výrobě dielektrických vrstev bylo použito c-PVP a SU-8, kde c-PVP bylo lépe optimalizované pro tisk na inkjet tiskárně. Vrstva ZnO byla žíhána 2 h při 150 °C a vrstva c-PVP 40 min při 150 °C. Napaření hliníkové elektrody bylo provedeno v napařovačce (přílohy, Obr.5.1). Pro vymezení hranic napaření byly použity masky dodané výrobcem přímo k substrátu. Vyrobené vzorky viz Obr.3.5.

Druhá verze vzorků vznikla na křemíkových substrátech dodaných od firmy ON Semiconductor. Jako hradlovou elektrodu jsem použil substrát z degenerovaného polovodiče s velkou vodivostí. Substráty mají již z výroby definovanou vrstvu SiO₂ na povrchu, proto jsem tuto vrstvu využil jako dielektrikum. Pro tisk elektrod jsem použil stříbrný inkoust. Natisknuté elektrody naleznete na Obr. 3.7. Každá elektroda byla po natisknutí vyžehána 2h při 120 °C, kvůli zlepšení vodivosti vrstev. Dále přes tyto elektrody byla nanесena vrstva ZnO. Pro tyto vrstvy byl zvolen inkoust od Sigma-Aldrich v nedotované verzi. Tento inkoust byl žíhán při 120 °C po dobu 2 h.



Obrázek 3.7: Tištěné elektrody na křemíkovém substrátu

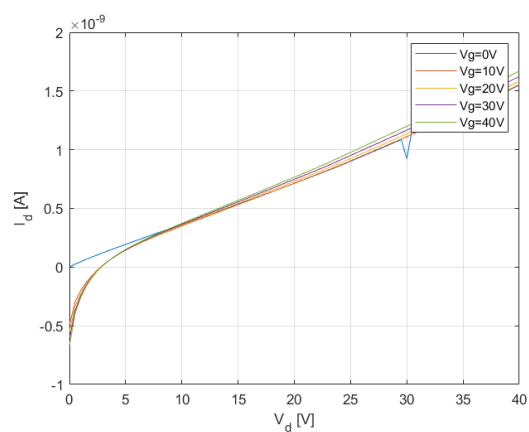
Poslední verze byla připravena na substrátu s vytvořenými elektrodami na litografu a vyvedeným kontaktem na substrát, viz Obr.3.6. Tento substrát si vyžadoval pouze tisk vrstev ZnO, proto byly použity všechny dostupné inkousty. Pro tyto inkousty jsem zvolil dva časy žíhání pro změření změny odporu vrstev. Časy žíhání byly 2 h a 12 h při 350 °C. Detail na strukturu vzorků po žíhání 12h naleznete na Obr. 3.8.



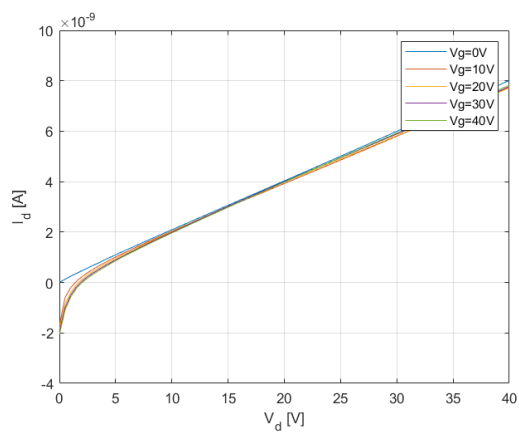
Obrázek 3.8: Detail na jednotlivé vzorky pro různé inkousty: připravený v laboratoři (nahore), Sigma-Aldrich nedotovaný (uprostřed), Sigma-Aldrich dotovaný Al (dole)

3.4 Naměřená data

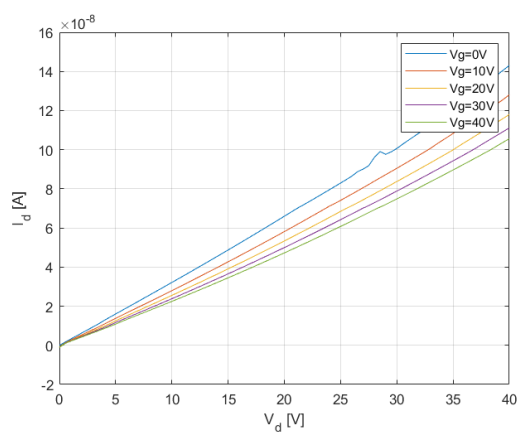
Všechna zde uvedená data byla naměřena na poslední verzi vzorku. Uvádím je zde z důvodu největší relevantnosti dat. Pro ostatní vzorky byla data prakticky neměřitelná nebo vzorky vykazovaly nízkou kvalitu. Uvádím zde pouze měření na 15 μm vzdálených elektrodách (Obr. 3.9, Obr. 3.10, Obr. 3.11), z důvodu velké podobnosti všech naměřených charakteristik. Jediný rozdíl v charakteristikách pro různé délky kanálu byl ve vodivosti. Všechny ostatní naměřené charakteristiky naleznete v příloze.



Obrázek 3.9: Výstupní charakteristika pro nedotovaný inkoust od Sigma-Aldrich



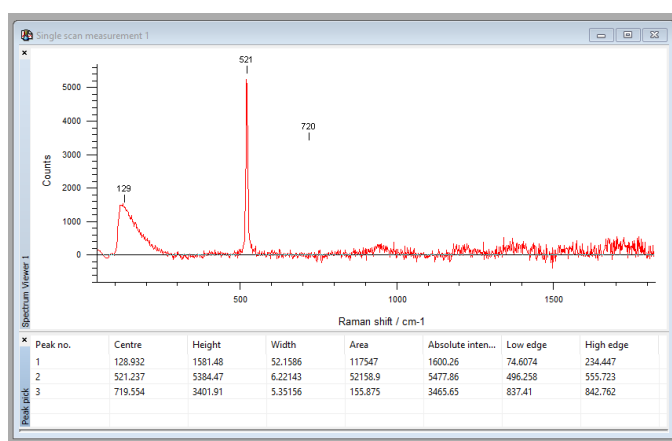
Obrázek 3.10: Výstupní charakteristika pro dotovaný inkoust od Sigma-Aldrich



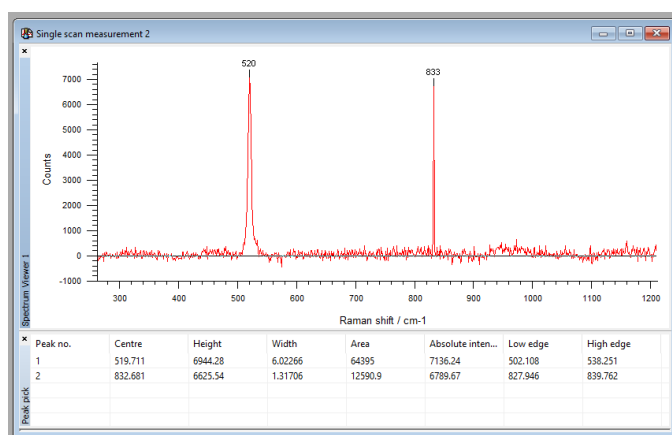
Obrázek 3.11: Výstupní charakteristika pro připravený inkoust

3. Výroba a charakterizace tranzistoru

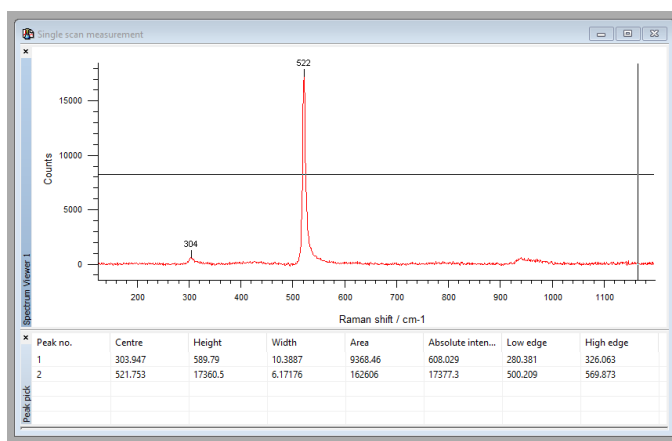
Dále byl vzorek našeho inkoustu měřen na Ramanovu spektroskopu, kde se měla prokázat přítomnost ZnO ve vzorku. Naměřená spektra byla prováděna na třech vlnových délkách laseru a to na 533 nm (Obr. 3.12), 633 nm (Obr. 3.13) a na 830 nm (Obr. 3.14). Jednotlivé hodnoty Ramanova posunu pro ZnO naleznete v Tab. 3.3. Dále bylo naměřeno spektrum pouze čistého vzorku bez tisknuté vrstvy, tedy vrstva SiO₂. Toto měření naleznete na Obr. 3.15.



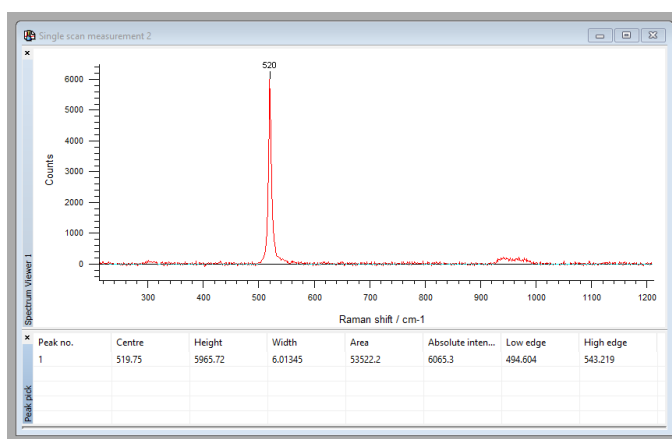
Obrázek 3.12: Spektrum z Ramanova spektroskopu na 533 nm, vzorek ZnO



Obrázek 3.13: Spektrum z Ramanova spektroskopu na 633 nm, vzorek ZnO



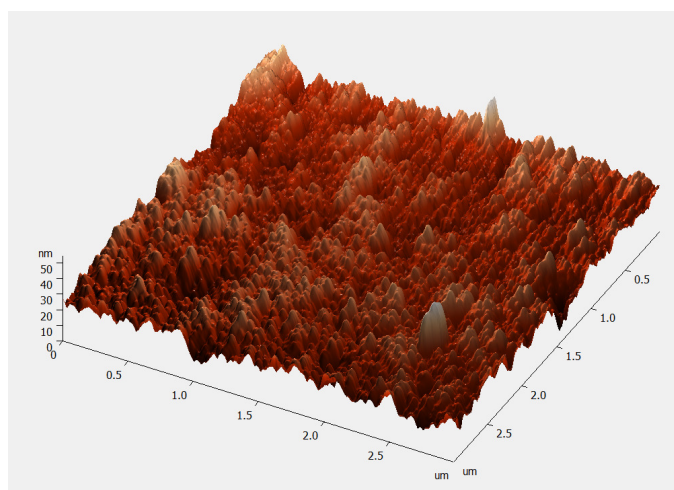
Obrázek 3.14: Spektrum z Ramanova spektroskopu na 830 nm, vzorek ZnO

Obrázek 3.15: Spektrum z Ramanova spektroskopu na 633 nm, vzorek SiO₂

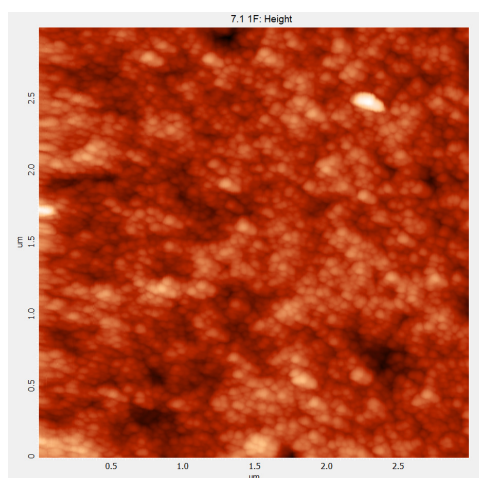
Mód	Ramanův posun [cm ⁻¹]
E ₂ ^{low}	92
E ₂ ^{high}	449
A ₁ (TO)	397
E ₁ (TO)	426
A ₁ (LO)	559
E ₁ (LO)	577

Tabulka 3.3: Hodnoty Ramanova posunu pro ZnO převzato z [23]

Poslední měření prováděné na vzorku bylo pomocí AFM, kde se zjišťuje profil vrstvy ZnO nanesené na vzorku. Byl měřen opět vzorek našeho inkoustu na ploše $3 \times 3 \mu\text{m}$. Výsledný profil naleznete na Obr. 3.16, kde je 3D zobrazení povrchu, a na Obr. 3.17, kde je zobrazen plošný model.



Obrázek 3.16: 3D zobrazení z měření pomocí AFM



Obrázek 3.17: 2D zobrazení z měření pomocí AFM

Kapitola 4

Závěr

V této práci jsem zhodnotil dnešní stav tištěných struktur a zhotovil tři verze vzorků tranzistoru. Všechny vrstvy ZnO se povedlo úspěšně vytisknout pomocí inkjet tiskárny. Při měření voltampérových charakteristik jednotlivých vrstev byl zjištěn velký nárůst vodivosti pro delší čas a teplotu žhání. Tento fakt se shoduje s prací [24]. Z hlediska vodivosti byl inkoust připravený v laboratoři nejlepší volbou. Avšak, inkousty od Sigma-Aldrich se lépe chovaly při tisku jednotlivých vrstev. Připravený inkoust tvořil nehomogenní hrany, nerovnoměrně vysychal a opakovaně znemožňoval průchod inkoustu tryskou tiskárny. Tyto problémy byly způsobeny nevyhovující viskozitou a výskytem částic větších než je průměr trysky. Zneprůchodnění trysky bylo následně omezeno filtrací před vložením do cartridge. Rozdíl mezi kvalitou jednotlivých vrstev je vidět na Obr. 3.8 a na Obr. 3.2.

Tisk druhého typu vzorků byl provázen obdobnými problémy. Stříbrný inkoust, který byl použit pro tisk elektrod se příliš roztékal a tvořil zkrat mezi nimi. Detail na kvalitu těchto elektrod naleznete na Obr. 3.7. Tyto vzorky nebyly vhodné pro měření kvůli nespolehlivosti vytvořených kontaktů. Dalším aspektem byla nedefinovaná vzdálenost elektrod a následná nemožnost porovnat jednotlivé výsledky.

Poslední verze vytisknutých struktur se nejlépe hodila pro měření parametrů nanosené vrstvy. Elektrody vytvořené pomocí litografie eliminovaly nedefinovanost vzdáleností. Při měření jednotlivých charakteristik nebyl zaznamenán tranzistorový jev. Rozbíhání jednotlivých charakteristik od sebe a záporné proudy drainem, byly nejspíše způsobeny parazitními svodovými proudy, tekoucími po povrchu substrátu. Rozdíl potenciálů mezi gate a drain/source způsobil zdánlivou změnu vodivosti kanálu pro různá napětí V_g . Tento efekt se měnil se vzdáleností drain/source a gate elektrod od sebe. Pro nejbližší elektrody je efekt nejvýraznější, viz Obr. 3.10.

Dále bylo provedeno měření na Ramanově spektroskopu, které neprokázalo přítomnost ZnO ve vzorku. Tento problém mohl být způsoben vysokou transparentností a malou tloušťkou vrstvy. Dále byl naměřen profil vzorků pomocí AFM (Obr. 3.16, Obr. 3.17). Z těchto obrázků lze vidět velikost zrn polykrystalického ZnO.

Pro pokračování této práce bych navrhl hlubší prozkoumání složení jednotlivých inkoustů a výrobu nových vzorků na menších strukturách. Výhoda menších struktur by spočívala ve vytvoření většího elektrického pole uvnitř polovodiče pro vybuzení tranzistorového jevu. Další možností by bylo změnit parametry jednotlivých inkoustů, jako je např. koncentrace ZnO ve vzorku nebo změnit teplotu a dobu žíhání.



Literatura

- [1] Dongjo Kim, Youngmin Jeong, Keunkyu Song, Seong-Kee Park, Guozhong Cao, and Joocho Moon. Inkjet-printed zinc tin oxide thin-film transistor. *Langmuir*, 25(18):11149–11154, 2009. PMID: 19735156.
- [2] Clair TROADEC. From technologies to market workshop flexible electronics iitc/mam conference. In: *Workshop Flexible Electronics IITC / MAM Conference*, B.m.: YOLE Development, 2015.
- [3] Ossila. Spin coating: A guide to theory and techniques [online]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/spin-coating#spin-coating-general-theory>. [cit. 8.5.2019].
- [4] Ossila. Dip coating theory: Film thickness [online]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/pages/dip-coating-theory-film-thickness#Overview>. [cit. 8.5.2019].
- [5] A. Berni, M. Mennig, and H. Schmidt. *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*. Springer US, Boston, MA, 2004.
- [6] Dragoljub Novaković, Nemanja Kašiković, Gojko Vladić, and Magdolna Pál. 15 - screen printing. In Joanna Izdebska and Sabu Thomas, editors, *Printing on Polymers*, pages 247 – 261. William Andrew Publishing, 2016.
- [7] Muhammed Karim. *Inkjet-Printed Microelectromechanical Systems: Materials, Process and Devices*. PhD thesis, EECS Department, University of California, Berkeley, Dec 2017.
- [8] Atashah Soleimani-Gorgani. 14 - inkjet printing. In Joanna Izdebska and Sabu Thomas, editors, *Printing on Polymers*, pages 231 – 246. William Andrew Publishing, 2016.
- [9] H. Tseng. Scaling of inkjet-printed transistors using novel printing techniques. *UC Berkeley*, 2011. ProQuest ID: Tseng_berkeley_0028E_12135. Merritt ID: ark:/13030/m5j10785. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/6wx787mp>.

- [10] J. Perelaer. *Microstructures prepared via inkjet printing and embossing techniques*. PhD thesis, Department of Chemical Engineering and Chemistry, 2009.
- [11] Katsuaki Suganuma. *Introduction to printed electronics*. SpringerBriefs in electrical and computer engineering. Springer, 1 edition, [2014].
- [12] Sigma-aldrich, silver dispersion [online]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/736465?lang=en®ion=CZ>. [cit.:2.4.2019].
- [13] Sigma-aldrich, aluminum-doped zinc oxide nanoparticle ink [online]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/808180?lang=en®ion=CZ>. [cit.:2.4.2019].
- [14] Sigma-aldrich, zinc oxide nanoparticle ink [online]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/808202?lang=en®ion=CZ>. [cit.:2.4.2019].
- [15] Microchem, prialex® jettable polymeric materials [online]. Dostupné z: <http://www.microchem.com/PriElex.htm>. [cit.:2.4.2019].
- [16] Ossila, interdigitated ito substrates for ofet and sensing [online]. Dostupné z: <https://www.ossila.com/products/interdigitated-ito-ofet-substrates>. [cit.:16.5.2019].
- [17] Werner Zapka. *Pros and Cons of Inkjet Technology in Industrial Inkjet Printing*, chapter 1, pages 1–6. John Wiley Sons, Ltd, 2017.
- [18] FUJIFILM. Dimatix materials printer dmp-2800 series vol.2. December 8,2010.
- [19] Agilent Techlogies. Agilent 4155c semiconductor parameter analyzer users guide. 2001.
- [20] Faruque Hossain, J Nishii, S Takagi, Akira Ohtomo, Tomoteru Fukumura, H Fujioka, H Ohno, Hideomi Koinuma, and M Kawasaki. Modeling and simulation of polycrystalline zno thin-film transistors. *Journal of Applied Physics*, 94, 08 2003.
- [21] Yen Nan Liang, Boon Keng Lok, Libo Wang, Chengang Feng, Albert Chee Wai Lu, Ting Mei, and Xiao Hu. Effects of the morphology of inkjet printed zinc oxide (zno) on thin film transistor performance and seeded zno nanorod growth. *Thin Solid Films*, 544:509 – 514, 2013. The 6th International Conference on Technological Advances of Thin Films Surface Coatings.

- [22] Sang Chul Lim, Ji Young Oh, Jae Bon Koo, Chan Woo Park, Soon-Won Jung, Bock Na, and Hye Yong Chu. Electrical properties of solution-deposited zno thin-film transistors by low-temperature annealing. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14, 11 2014.
- [23] Frédéric Decremps, Julio Pellicer-Porres, A. Marco Saitta, Jean-Claude Chervin, and Alain Polian. High-pressure raman spectroscopy study of wurtzite zno. *Phys. Rev. B*, 65:092101, Feb 2002.
- [24] N. Sadananda Kumar, Kasturi V. Bangera, and G. K. Shivakumar. Effect of annealing on the properties of zinc oxide nanofiber thin films grown by spray pyrolysis technique. *Applied Nanoscience*, 4(2):209–216, Feb 2014.

Kapitola 5

Přílohy

Seznam příloh

1. Napařovačka materiálů
2. Pec pro žíhání vzorků
3. Flowbox
4. Ultrazvuková čistička
5. Sestava AFM
6. Výstupní char. připravený 5 μm , 12h
7. Výstupní char. připravený 10 μm , 12h
8. Výstupní char. nedotovaný 7.5 μm , 12h
9. Výstupní char. nedotovaný 20 μm , 12h
10. Výstupní char. dotovaný 7.5 μm , 12h
11. Výstupní char. dotovaný 20 μm , 12h
12. Převodní char. připravený, 10 μm , 12h
13. Převodní char. nedotovaný, 7.5 μm , 12h
14. Převodní char. dotovaný, 7.5 μm , 12h

■ Přílohy



Obrázek 5.1: Napařovačka materiálů



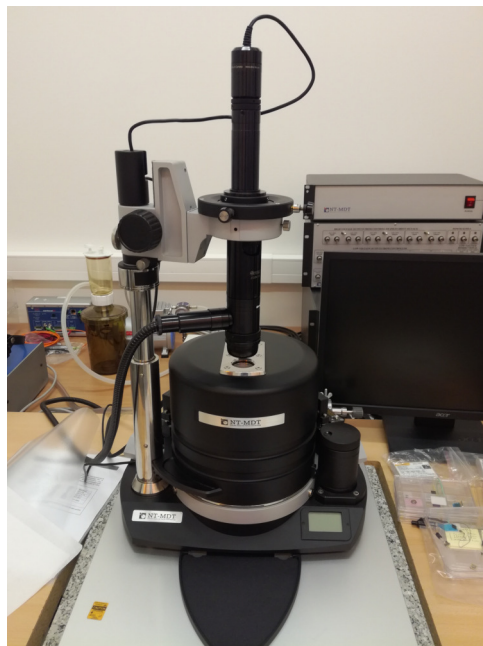
Obrázek 5.2: Pec pro žíhání vzorků



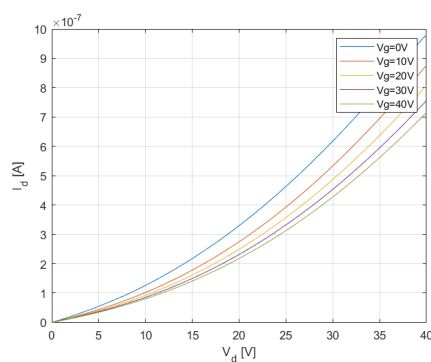
Obrázek 5.3: Flowbox



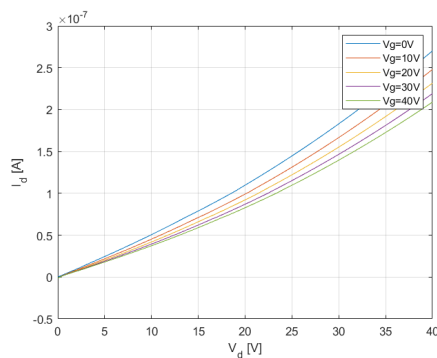
Obrázek 5.4: Ultrazvuková čistička



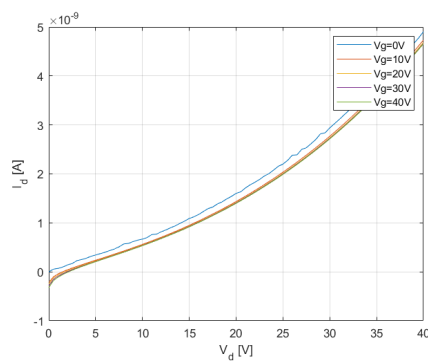
Obrázek 5.5: Sestava AFM



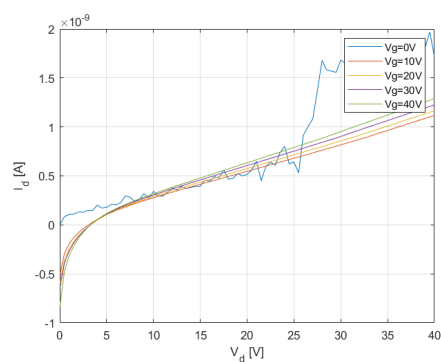
Obrázek 5.6: Výstupní charakteristika pro připravený inkoust, 5 μm , 12h žíhání



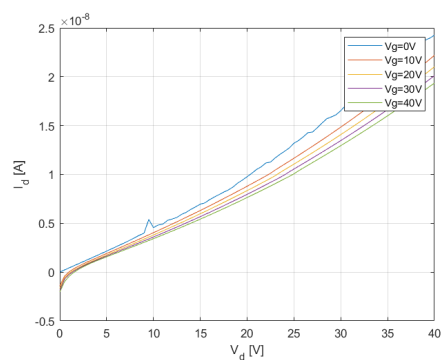
Obrázek 5.7: Výstupní charakteristika pro připravený inkoust, 10 μm , 12h žíhání



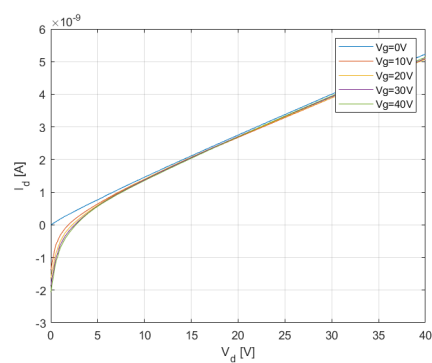
Obrázek 5.8: Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, 7.5 μm , 12h žíhání



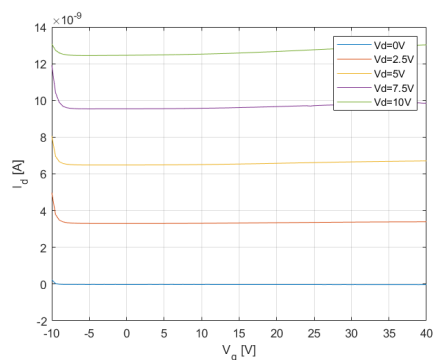
Obrázek 5.9: Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, $20 \mu\text{m}$, 12h žíhání



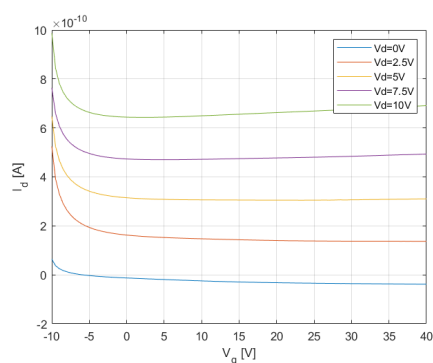
Obrázek 5.10: Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, $7.5 \mu\text{m}$, 12h žíhání



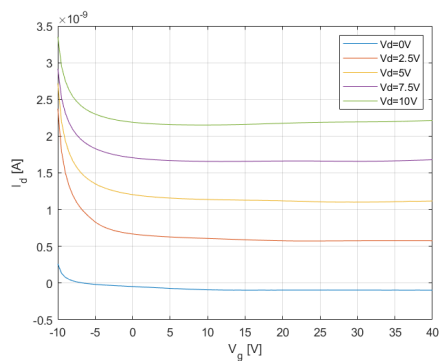
Obrázek 5.11: Výstupní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, $20 \mu\text{m}$, 12h žíhání



Obrázek 5.12: Převodní charakteristika pro připravený inkoust, $15 \mu\text{m}$, 12h žíhání



Obrázek 5.13: Převodní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich nedotovaný, $7.5 \mu\text{m}$, 12h žíhání



Obrázek 5.14: Převodní charakteristika pro inkoust Sigma Aldrich dotovaný, $7.5 \mu\text{m}$, 12h žíhání