

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta chemická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Radim Bartoš



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

TIŠTĚNÉ TRANSPARENTNÍ ELEKTRICKY VODIVÉ VRSTVY

PRINTED TRANSPARENT OXIDE CONDUCTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Bartoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK0808/2014
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Student: **Radim Bartoš**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Spotřební chemie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Název bakalářské práce:

Tištěné transparentní elektricky vodivé vrstvy

Zadání bakalářské práce:

1. Vypracujte literární rešerši shrnující současný stav poznání o výrobě anorganických TCO vrstev a možnostech jejich tisku.
2. Prostudujte možnosti inkjetového tisku TCO obrazců s využitím organických prekurzorů.
3. Prostudujte fyzikálně-chemické vlastnosti vytištěných TCO obrazců.

Termín odevzdání bakalářské práce: 19.5.2017

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Radim Bartoš
student(ka)

doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2017

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

Abstrakt

Byly připraveny a charakterizovány vrstvy oxidu cíničitého dopovaného fluorem a antimonem technikami spin-coating a materiálovým tiskem pomocí tiskárny Dimatix. Jako zdroje cínu, antimonu a fluoru byly použity anorganické i organické prekurzory. Odpor vrstev byly změřeny čtyřbodovou sondou a tloušťka vrstev byla změřena pomocí profilometru. Vrstvy byly analyzovány metodou rentgenové difrakce (XRD) a pomocí rastrové elektronové mikroskopie (SEM).

Klíčová slova

Oxid cíničitý, dopování, fluor, antimon, solgel, materiálový tisk, tenké vrstvy, spincoating, ATO, FTO.

Abstract

Thin films of tin oxide doped by fluorine or antimony were prepared by spincoating technique and material printing technique. Plenty of inorganic and organic compounds were used as precursors of fluorine and antimony. Sheet resistance of films were measured by 4-probe method and film thickness were determined by contact profilometer. Films were analyzed by X-ray diffraction (XRD) and scan electron microscopy (SEM).

Key words

Tin oxide, doping, fluorine, antimony, solgel, material printing, thin films, spincoating, ATO, FTO.

BARTOŠ, R. *Tištěné transparentní elektricky vodivé vrstvy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2017. 35 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Dzik, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

Podpis studenta

Poděkování:

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu, doc. Ing. Petru Dzikovi, Ph.D., za odborné, obětavé, vstřícné a trpělivé vedení mé bakalářské práce. Poděkovat bych chtěl také doc. Ing. Michalu Veselému, CSc. jako vedoucímu laboratoře za vstřícnost a obětavost, kterou mi v průběhu mnohokrát prokazoval. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině za nesmírnou podporu navzdory všem nesnázím, které se v průběhu naskytly, a také děkuji všem svým kolegům spolužákům v laboratoři, kteří vytvořili příjemný kolektiv a prostředí při práci.

Obsah

1	ÚVOD.....	6
2	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	7
	2.1 Transparentní vodivé vrstvy	7
	2.2 Metody nanášení	7
	2.2.1 Chemické napařování (CVD).....	7
	2.2.2 Fyzikální napařování (PVD)	7
	2.2.3 Dip coating	8
	2.2.4 Spin coating.....	8
	2.2.5 Sprejová pyrolýza.....	9
	2.2.6 Inkjetový tisk.....	9
	2.3 Principy použitých analytických metod.....	11
	2.3.1 Rentgenová difrakce XRD	11
	2.3.2 Čtyřbodová sonda.....	12
	2.3.3 Profilometr	12
	2.3.4 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)	14
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	16
	3.1 Použité chemikálie, materiály a přístroje.....	16
	3.2 Připravené kompozice a vzorky.....	17
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	19
	4.1 Profilometrické měření	19
	4.2 Čtyřbodová sonda	25
	4.3 XRD analýza.....	27
	4.4 SEM analýza.....	29
5	ZÁVĚR	32
6	CITACE	33
7	SEZNAM ZKRATEK	35

1 ÚVOD

Oxid cíničitý je transparentní vodivý materiál s n-typem zakázaného pásu. Má široké uplatnění, zejména v elektrotechnice, solárních článcích, elektroluminiscenčních zařízeních, pasivních elektrodách a mnoha dalších.

Pro zlepšení jeho vlastností se dopuje jinými prvky, mezi něž patří indium, fluor, antimon, molybden, kadmium a další.¹

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou takovýchto tenkých vrstev na bázi oxidu kovů, konkrétně oxidu cíničitého, který je dopován dalšími prvky jako fluorem nebo antimonem. Vzorky jsou vytvořeny solgelovou metodou z organických prekurzorů.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Transparentní vodivé vrstvy

Transparentní vodivé oxidy jsou dopované oxidy kovů užívané v optoelektronice jako například ve fotovoltaiice. Většina je připravována v polykrystalické nebo amorfni mikrostruktuře. Využívané jsou materiály, které mají větší než 80 % transmitanci slunečního záření. Současně mají vysokou vodivost a šířku zakázaného pásu větší než 3,2 eV k zabránění absorpce záření v celém slunečním spektru.

V současnosti jsou nejrozšířenějším TCO n-typy vodičů, které většinu přenosu elektrického proudu obstarávají donory elektronu. Přenos proudu je v tomto typu vodiče rychlejší než přenos pomocí elektronových děr (p-typ).

Bylo vyvinuto i mnoho nedopovaných materiálů jako jedna z cest. Tyto systémy jsou obvykle n-typy vodičů s koncentrací nosičů v obdobném řádu jako v případě dopovaných. Ale jejich silná závislost elektrických vlastností na teplotě a koncentraci kyslíku v okolí zabraňuje nalezení vhodných praktických využití.

Indiem dopovaný oxid cínčitý je v průmyslu používán jako standard pro TCO. Odpor se pohybuje $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ a transmitance nad 80 %. Díky jeho ceně je ale snaha o jeho nahrazení. Jeho alternativou je například hliníkem dopovaný oxid zinečnatý nebo indiem dopovaný oxid kademnatý.¹⁻³

2.2 Metody nanášení

2.2.1 Chemické napařování (CVD)

Jedna z nejčastěji využívanějších metod nanášení vzorků. Princip je nanášení pevných vzorků z plynné fáze na substrát. To je zajištěno chemickou reakcí mezi plynnou složkou a povrchem substrátu, na který je vzorek nanášen. Plynný prekursor prochází po povrchu vyhřívaného substrátu, na kterém dochází k chemické reakci, jejímž produktem je pevná fáze vzorku na substrátu.

Existuje několik typů CVD procesů mezi něž patří atmosférická CVD, laserová CVD, fotochemická CVD a další.⁴

2.2.2 Fyzikální napařování (PVD)

Proces je z části podobný CVD. Hlavním rozdílem je však to, že nanášený prekursor začíná v pevném stavu, nikoliv v plynném. Proces je složen z několika kroků. První krok je vypaření vzorku vysokoenergetickým zdrojem jakým je např. elektronový paprsek. Druhým krokem je transport vzorku k povrchu substrátu. Během druhého kroku dochází i k reakci vypařeného kovu s plynem, může jít o kyslík, dusík a další. Nakonec samotná depozice vzorku na substrát.

Dalším rozdílem od CVD je, že vzorek je vázaný na substrát pouze fyzikálními silami, nikoliv chemickými vazbami.

PVD má několik výhod. První je, že může vylepšovat některé vlastnosti substrátu. Další výhodou je v široké škále použitelných materiálů, anorganických nebo organických. PVD je často pro neškodný pro životní prostředí. Nevýhodami jsou problémy s tvorbou komplexů během nanášení, vysoká cena a nízká účinnost.⁴

2.2.3 Dip coating

Dip coating je technika, při níž je substrát ponořen přednastavenou rychlostí do lázně nanášeného materiálu se známou viskozitou a poté je kontrolovanou rychlostí opět vytahován. Následuje sušení.

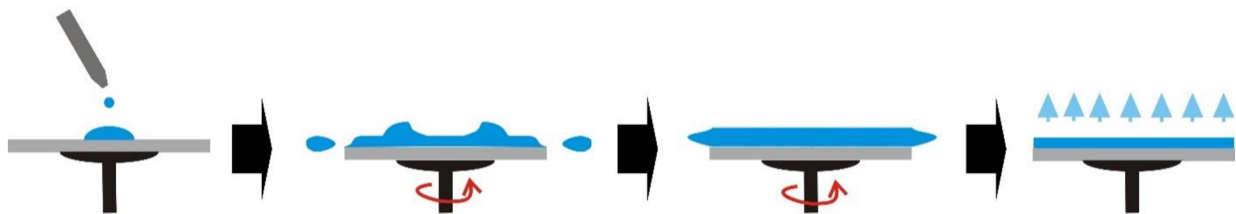
Technika dip coating je silně závislá na viskozitě vzorku. Ta musí zůstat po celou dobu nanášení neměnná.⁴

2.2.4 Spin coating

Spin coating je technika používající se pro nanášení tenkých, souvislých vrstev na rovný povrch. Často je používána k tvorbě fotorezistorů. Jejich obvyklá tloušťka vrstvy je v řádu mikronů.

Při spin-coatingu je nanášena malá kapka vzorku do středu substrátu. Poté je substrát roztočen na nastavenou rychlost otáček. Odstředivá síla roznese vzorek po substrátu a přebytečné množství kapaliny je odstraněno na hraně substrátu. Vzniklý film se ztenčuje do ustavení rovnováhy nebo drastickému zvýšení viskozity kvůli vypaření rozpouštědla.⁵

Schématické znázornění procesu je na obrázku (Obrázek 1). Využití nachází spin-coating zejména v mikroelektronice (mikroobvody, fotorezistory, tranzistory, diody, kompaktní a magnetické disky, senzory a mnohé další).



Obrázek 1: Schéma procesu nanášení pomocí metody spin-coating⁶

Existují 2 způsoby nanášení: dynamický a statický. U dynamického nanášení je materiál nanášen přímo na rotující substrát, kdežto u statického způsobu nanášení je materiál nejdříve nanášen na substrát a následně je substrát i s nanášeným materiálem roztočen. Velkou výhodou dynamického nanášení je menší spotřeba nanášeného roztoku, ale pokud je nanášený roztok hodně viskózní, je lepší použít statický způsob nanášení. Pokud chceme vytvořit kvalitní vrstvu pomocí statického způsobu nanášení, je potřeba před samotným spinováním rozprostřít materiál po co největší ploše substrátu, toho lze dosáhnout buď dávkovací pipetou nebo puštěním spin-coateru na nízké otáčky.⁷

2.2.5 Sprejová pyrolýza

Sprejová pyrolýza je technika přípravy tenkých vrstev. Na rozdíl od mnoha jiných metod depozice, sprejová pyrolýza představuje snadnou a relativně levnou metodu, hlavně v pořizovacích nákladech. Technika nepotřebuje vysoce kvalitní substance nebo chemikálie. Nanesené vrstvy jsou drsné a porézní vhodné například pro přípravu prachu. Velmi snadno lze připravovat vícevrstvé materiály s různými složeními jednotlivých vrstev.

Typická výbava obsahuje atomizér a nádobu na kapalný prekurzor, topnou desku na substrát a senzor teploty. K atomizaci nejčastěji slouží vzduch, kdy se kapičky prekurzoru dostávají do proudu plynu, ultrazvuk, který svou vysokou frekvencí rozbíjí kapičky a elektrostatické působení, kdy je kapalina vystavena silnému elektrickému poli.

Rozptýlený prekurzor dopadá na horký substrát a okamžitě se kalcinuje. Běžně lze provádět sprejovou pyrolýzu v libovolném plynu a za sníženého i zvýšeného tlaku.⁸

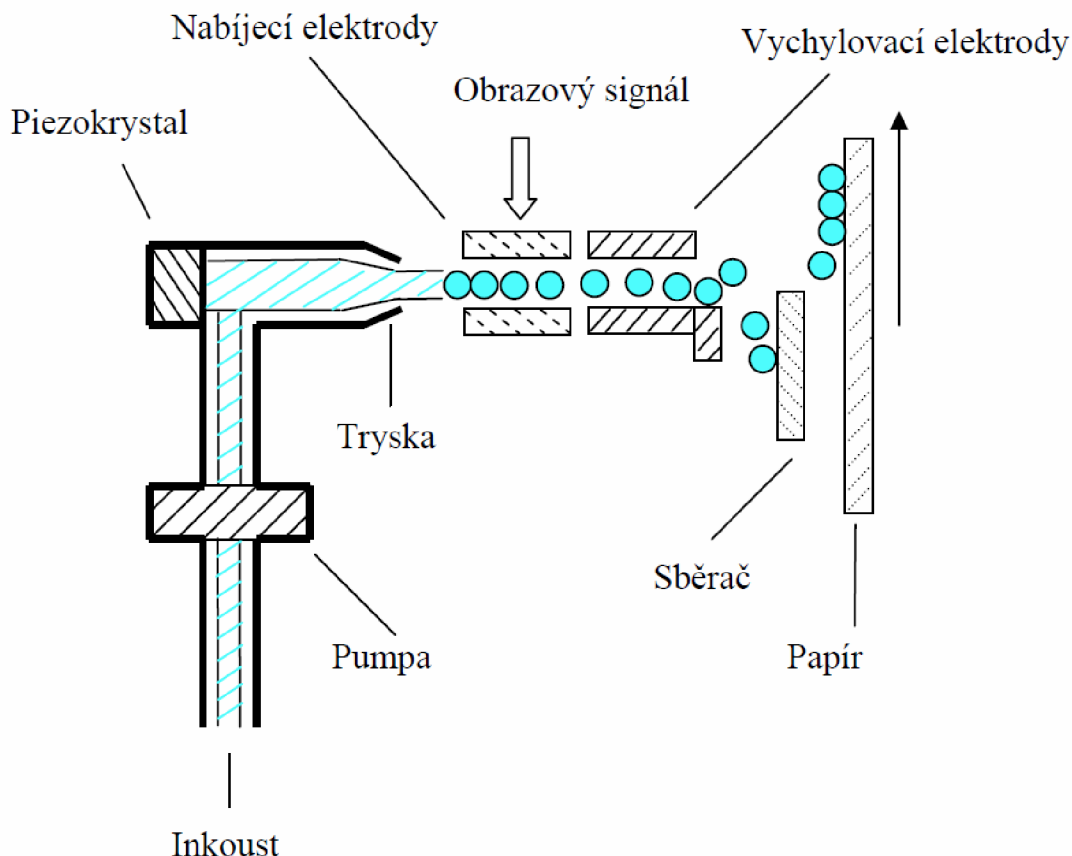
2.2.6 Inkjetový tisk

Je to digitální tiskový proces, při kterém je inkoust nanášen na substrát. Inkoustové tiskárny jsou nejčastěji používané zařízení pro barevnou reprodukci v domácnostech nebo kancelářích. Vzhledem k možnosti potisku velkého množství různých materiálů, narůstá její použití v polygrafickém a obalovém průmyslu.

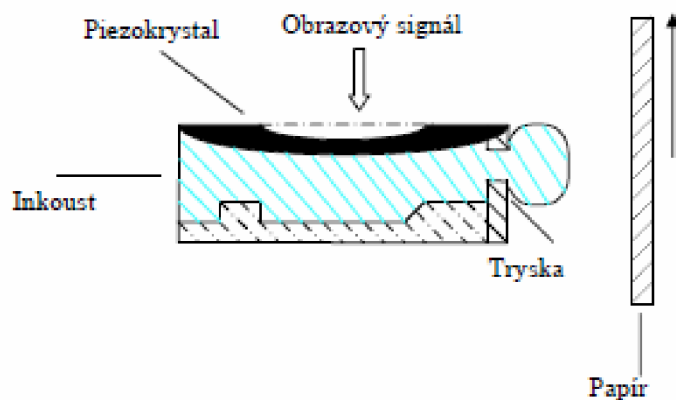
Princip spočívá v kontrolovaném umístění kapek inkoustu na substrát. Lze velmi snadno kontrolovat velikost kapky, umístění i jejich počet na jednom místě. Počet kapek v závislosti na čase určuje rychlost tisku.

Existují dvě základní metody tisku. Těmi jsou *drop on demand (DOD)*, fungujícím tak, že kapky jsou tvořeny pouze v případě, že je jich potřeba, a *continual stream (CS)*, kde trysky tvoří kapky neustále a ty nechtěné, jsou zachycovány a na substrát se tak nedostanou. V tomto případě jsou kapky tvořeny ve frekvenci až stovek kHz. Zachycování kapek je pak zajištěno jejich nabitím a následnou úpravou trasy pomocí elektrod.

V případě DOD metody jsou kapky tlačeny tryskami termálním procesem, kdy je inkoust zahříván až do jeho vypaření, čímž se zvýší tlak, který se kompenzuje vytlačením inkoustu přes trysku. Dalším typem je piezo-injektový systém, kdy je kapka tvořena čistě mechanickým vytlačením z inkoustové komory. Obrázek 2 resp. Obrázek 3 znázorňuje schéma kontinuálního procesu tisku resp. piezo-injektového drop on demand tisku.^{9,10}



Obrázek 2: Schéma continual stream tisku⁹



Obrázek 3: Schéma drop on demand piezo-injektového tisku⁹

Použitá tiskárna Dimatix DMP-2800 má plochu velikosti A4 a velikost vzorku tedy může být až 200 x 300 mm a využívá piezoeletrickou kazetu. Maximální výška substrátu je 25 mm. Teplotní limit, na který lze vyhřát desku je 60 °C. Kazety umožňují plnit ji vlastními inkousty, Každá kazeta má 16 trysek s určitou velikostí kapek, kterou lze regulovat elektrickým impulzem vstupujícím do piezoelektrické tiskové hlavy. Toto zařízení lze použít i k materiálovému tisku funkčních vrstev pouhou záměnou inkoustu za prekurzorové kompozice.

2.3 Principy použitých analytických metod

2.3.1 Rentgenová difrakce XRD

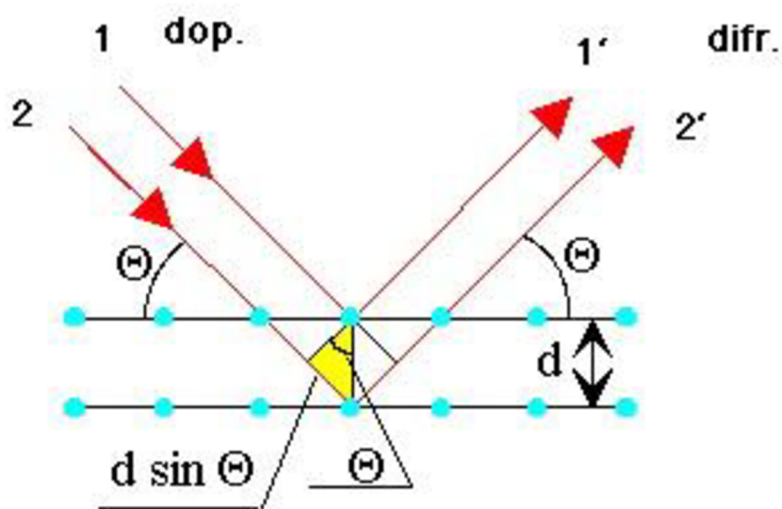
Rentgenové difraktometry se skládají ze tří základních prvků. Jsou s nimi rentgenová trubice, držák na vzorky a detektor.

Rentgenové záření je generováno v katodě ohřátím vlákna, čímž se vyprodukuje elektrony, které jsou urychleny napětím a ty narážejí do materiálu. Když mají elektrony dostatečnou energii k proniknutí do vnitřních vrstev elektronového obalu v cíleném materiálu, tam vyrazí původní elektron, čímž se vygeneruje charakteristické spektrum rentgenového záření. K rentgenové difrakci je ale nutné monochromatické záření. Spektrum je tedy filtrováno. Výsledné monochromatické záření je směřováno na vzorek.

Vzorek a detektor se otáčejí a zaznamenává se intenzita odraženého záření. Ve chvíli, kdy se geometrie dopadajícího rentgenového záření splní Braggovu rovnicí, vznikne složená interference a detektor změří pík v intenzitě odraženého záření.

Geometrie difraktometru je taková, že vzorek se otáčí v dráze rentgenového paprsku v úhlu θ , zatímco detektor sbírající odražené paprsky se pohybuje v úhlu 2θ . Obvyklé měření probíhá v rozsahu 2θ od 5° do 70° . Úhly se pak v grafu vynášejí na osu x .¹¹

Každá rovina krystalové mřížky rozptýlí malé množství záření a celkový rozptyl z velkého počtu rovin poskytne dostatečnou intenzitu k měření. Mechanismus působení je naznačen v obrázku (Obrázek 4). Interferenční maximum nastává v případě, že rozdíl vzdálenosti, kterou urazí paprsky odražené od různých vrstev v krystalové mřížce je násobkem vlnové délky daného záření. Dráhový rozdíl paprsků 1' a 2' je pak roven $2d \sin \theta$, kde d je vzdálenost vrstev a úhel θ je úhel, který svírá paprsek s rovinou, od které se odráží.¹²



Obrázek 4: Rentgenová difrakce¹²

Braggova rovnice¹²:

$$2d \sin \theta = \lambda n \quad (1)$$

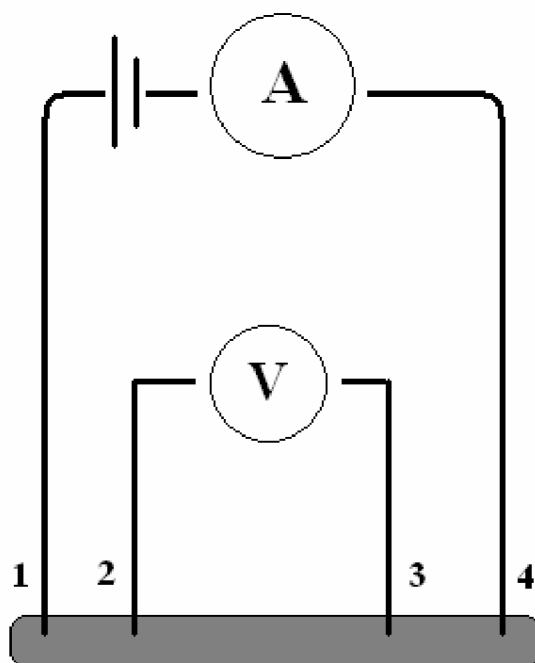
2.3.2 Čtyřbodová sonda

Čtyřbodová metoda, někdy též čtyřhrotová, je metoda měření odporu. Jejím základem jsou čtyři hrotové kontakty na měřící hlavici, uspořádané v přímce (lineární) nebo čtverci (čtvercová). U mnoha používaných přístrojů byly hroty uspořádané lineárně. Vnější hroty jsou proudové a vnitřní napěťové. Tímto se eliminuje nepřesnost měření vznikající poklesem napětí při průchodu elektrického proudu. Pro jednoduchost výpočtu jsou od sebe hroty vzdálené definovanou délkou, většinou kolem 1 mm.

Po přiložení měřící hlavičky k povrchu vzorku začne mezi vnějšími proudovými hroty procházet elektrický proud a na vnitřních napěťových hrotech se měří napětí na voltmetru s vysokým odporem. Na obrázku (Obrázek 5) je zobrazené schéma měření.^{13 14}

Je-li vzdálenost mezi jednotlivými hroty konstantní a tloušťka vrstvy je menší než 40 % vzdálenosti hrotů a rohy jsou vzdáleny od hrotů alespoň čtyřnásobně, než je jejich vzdálenost mezi sebou, průměrný plošný odpor je dán vztahem¹⁵:

$$R_s = 4,53 \cdot \frac{U}{I} = 4,53 \cdot R \quad (2)$$



Obrázek 5: Schéma měření čtyřbodovou sondou¹⁴

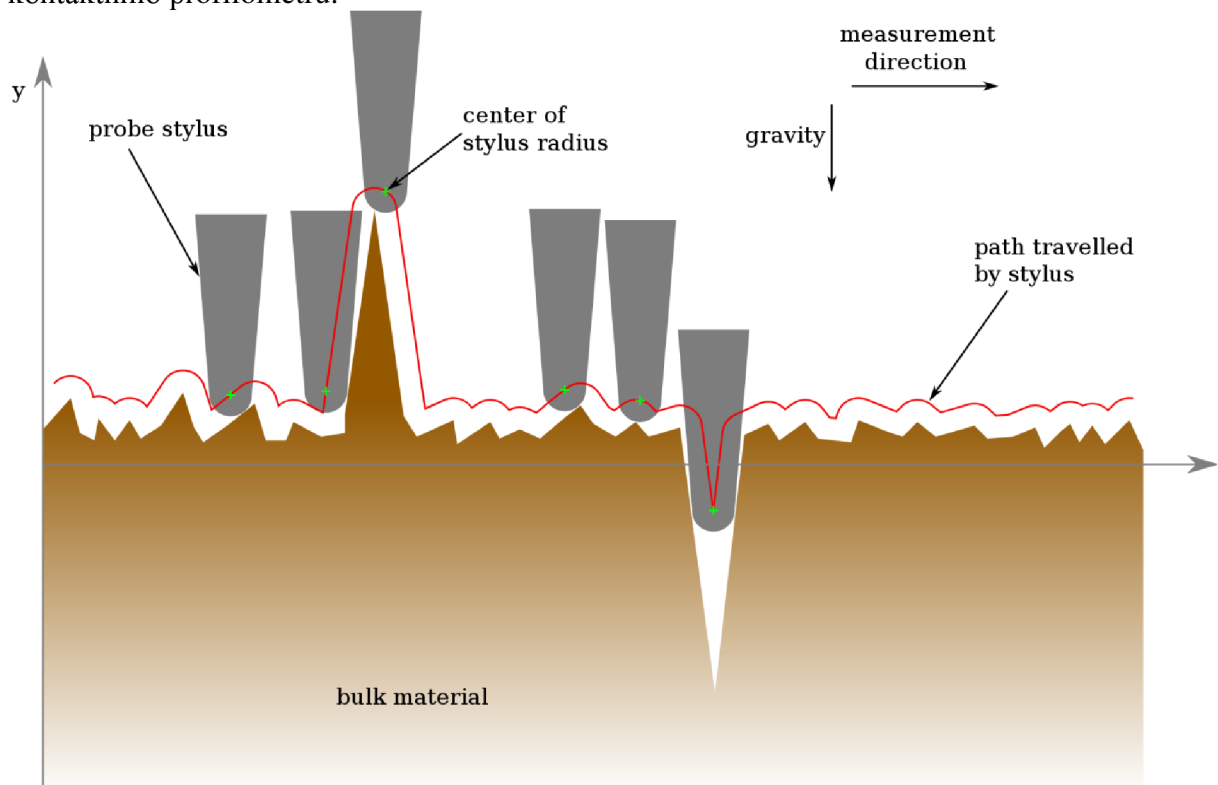
2.3.3 Profilometr

Profilometrie je metoda sloužící k analýze povrchů. S její pomocí lze vyhodnotit drsnost povrchu vzorků nebo třeba změřit tloušťku vrstev.

Existují dva základní typy profilometrie. Kontaktní a bezkontaktní měření.

Kontaktní měření je zajištěno pomocí diamantové jehly přitlačené definovanou silou. Tahjede po povrchu vzorku a přístroj snímá vertikální pozici jehly v závislosti na její horizontální poloze. Vertikální pozice jehly generuje analogový signál, který je poté

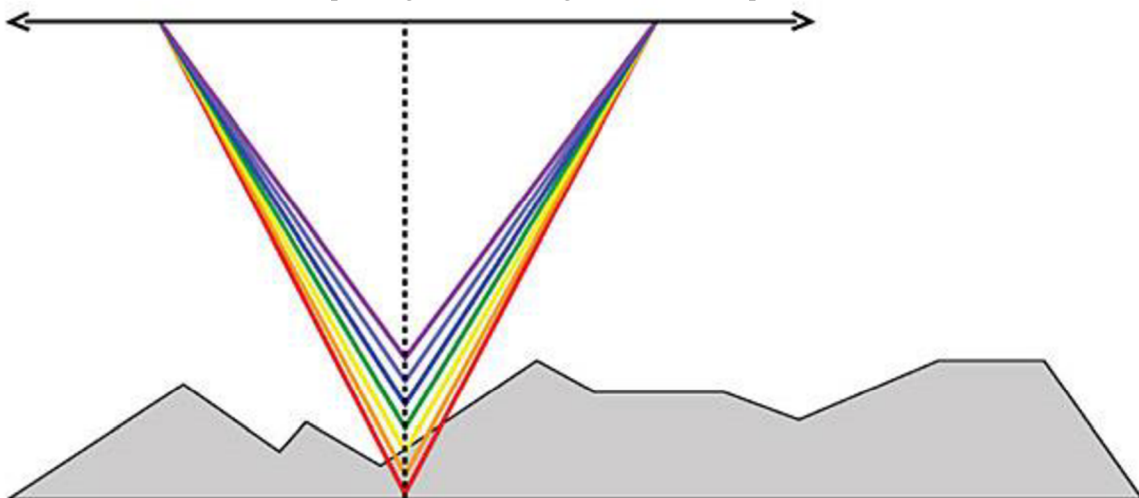
v počítači použit na rekonstrukci povrchu. Na obrázku (Obrázek 6) je princip měření kontaktního profilometru.



Obrázek 6: Měření kontaktním profilometrem¹⁶

Hlavní výhodou kontaktních profilometrů je jejich vertikální i horizontální rozlišovací schopnost. Při měření jim nevádí ani znečištění vzorku. Nevýhodou je pak možnost poškození náchylných vzorků během měření a délka měření.

Bezkontaktní měření je pak alternativou využívající světlo místo fyzické sondy. Tato metoda je založená na směrování světla, tak aby bylo možné měřit povrch ve 3D. Princip měření ilustruje Obrázek 7. Spojité bílé světlo je rozloženo disperzním prvkem a nasměrováno na vzorek a podle jeho odrazu je modelován povrch měřeného vzorku.¹⁷



Obrázek 7: Bezkontaktní profilometrie¹⁸

2.3.4 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

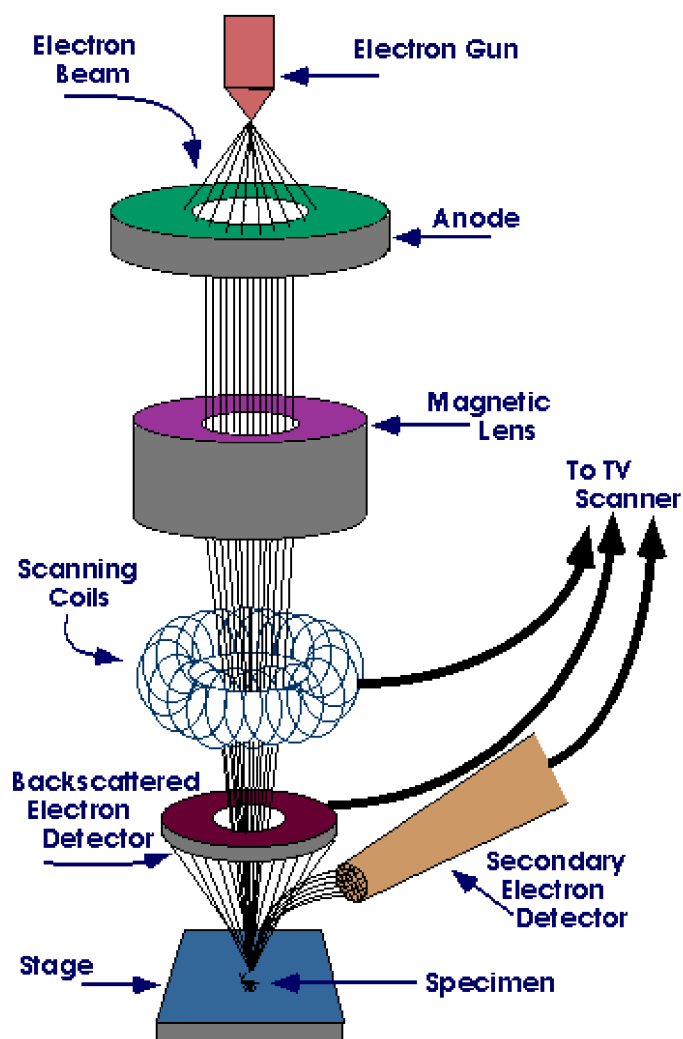
Tato metoda elektronové mikroskopie používá soustředěný paprsek vysokoenergetických elektronů generujících škálu různých signálů tvořených na povrchu pevného vzorku. Signál, který je odvozen z interakce se vzorkem dává informaci o vzorku včetně textury povrchu, krystalovitosti, orientaci materiálu ve vzorku nebo jeho prvkového složení. Díky tomuto je pomocí něj možno analyzovat vzorky kvalitativně nebo semikvantitativně a z toho vyhodnotit chemickou kompozici, krystalovou strukturu a její orientaci.

Zachycený signál obsahuje velké množství informací. Je to odezva sekundárních elektronů, generujících snímky SEM, zpětně odražené elektrony, difraktované zpětně odražené elektrony nesoucí informace o krystalové struktuře a její orientaci, rentgenové záření nesoucí informaci o složení vzorku, viditelné světlo a teplo. Tato metoda se řadí mezi nedestrukční metody, ale při měření může docházet k určitému spalování vzorku.

Hlavními omezeními této metody jsou maximální rozměry vzorků, nutnost stabilního vakua (okolo 10^{-4} Pa). To může vést k poškození některých vzorků obsahujících vlhkost nebo uhlovodíky.

Dalším omezením je, že měřené vzorky musí být alespoň na svém povrchu vodivé, jinak se budou nabíjet, což je na snímcích ukázáno jako světlejší místa. Nevodivé vzorky se obvykle musí nejdříve potáhnout nějakým vodivým materiálem. Obvykle se používá stříbro, ale možností je více.

SEM nedokáže detekovat velmi lehké prvky jako vodík, helium nebo lithium) a mnoho přístrojů nezvládá ani atomy s atomovým číslem nižším než 11.¹⁹



Obrázek 8: Schéma fungování SEM mikroskopu²⁰

Na obrázku výše (Obrázek 8) je zobrazeno schéma fungování. Ze zářiče, sloužící jako katoda jsou vyraženy elektrony, které jsou urychleny vnějším napětím. Neuspořádaný proud elektronů je poté pomocí elektromagnetického pole upravován. Poté elektrony dopadají v soustředném proudu na vzorek a měří se postupně každé místo po řádcích. Detekují se zpětně odražené elektrony a sekundární elektrony, které byly vyraženy z vnitřních vrstev elektronového obalu a informace se ukládají do počítače.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použité chemikálie, materiály a přístroje

2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9-hexadekafluorodekan-1,10-diol (F₁₆C₁₀)

Acetylaceton (AcAc)

Amonium trifluoroacetát

Ethanol (absolutní a 96 %) (EtOH)

ethyl-4,4,4-trifluoroacetoacetát

Fluorid amonný

chlorid antimonitý

chlorid cínatý (bezvodý)

chlorid cínatý (dihydrát)

isopropoxid antimonitý

isopropoxid cíničitý

isobutylalkohol (iBuOH)

isopropylalkohol (iPrOH)

Kyselina fluorovodíková (40 %)

Kyselina chlorovodíková (35 %)

Methanol (MeOH)

Peroxid vodíku

Triethanolamin (TEA)

Voda (deionizovaná)

Laboratorní mikroskla, Marienfeld

Pyrexové skla

Sodnovápenaté skla 5 × 5 cm

Čtyřbodová sonda Keythley 2100 6 ½ Digit Multimeter

Pec Elsklo MF5 s termoregulátorem OMRON E5CN

Profilometr Bruker Detak XT

Rastrový elektronový mikroskop

Spincoater CHEMAT TECHNOLOHY SPIN-COATER KW-4A

Tiskárna Dimatix DMP-2800

3.2 Připravené kompozice a vzorky

Tabulka 1 Soupis připravených solů

Kompozice	Sn prekurzor	F/Sb prekurzor	Rozpouštědlo	Další složky	
1	SnCl ₂	---	EtOH 96 %	AcAc	
2	SnCl ₂ .2H ₂ O	HF (40 %)	iPrOH		
3	SnCl ₂ .2H ₂ O	HF (40 %)	H ₂ O	AcAc	MeOH
4	SnCl ₂	F ₁₆ C ₁₀	EtOH 96 %	AcAc	
5	SnCl ₂	NH ₄ F	EtOH 96 %	AcAc	
6	SnCl ₂	CF ₃ COONH ₄	EtOH 96 %	AcAc	
7	SnCl ₂	F ₁₆ C ₁₀	EtOH 96 %	AcAc	H ₂ O ₂
8	SnCl ₂	SbCl ₃	EtOH 96 %	AcAc	
9	SnCl ₂	SbCl ₃	iPrOH	AcAc	H ₂ O
10	SnCl ₂	SbCl ₃	iBuOH	AcAc	H ₂ O
11	Sn(IV)-isopropoxid	Sb(III)-propoxid	iBuOH	TEA	H ₂ O
12	Sn(IV)-isopropoxid	Sb(III)-isopropoxid	iBuOH	TEA	H ₂ O

Kompozice byly nanášeny pomocí metody spincoating a kalcinovány při 450 °C.

Kompozice č. 1 byla nedopovaná a sloužila jako základ pro další. Konkrétně pro kompozice 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 10.²¹

Kompozice č. 2¹ sloužila jako koncentrační řada pro různé konečné koncentrace HF. Vzorky s nejnižší koncentrací obsahovaly 5 % HF, ale stejně tvořily vyleptané stopy v místě nakápnutí vzorku na substrát.

Kompozice č. 3²² byla připravena podle jiného postupu, ale bez rozdílných výsledků a tak bylo od kyseliny fluorovodíkové jako prekurzoru fluoru odstoupeno.

Kompozice č. 4, 5 a 6 byly připraveny stejně jako kompozice č. 1,²¹ jen před přidáním AcAc byly dopovány fluorem. Sloužily jako test různých prekurzorů fluoru. Bylo zjištěno, že fluorid amonný se choval obdobně jako kyselina fluorovodíková a již nebyl použit. Ze zbylých dvou dalších byl vybrán hexadekafluorodekandiol vzhledem k lepším vlastnostem připravených vrstev. Bylo zjištěno, že připravené vrstvy jsou silně amorfni, což mohlo způsobovat abnormálně vysoké odpory a tak byla připravena kompozice č. 7 s přídavkem peroxidu vodíku, který měl zlepšit krystalinitu připravovaných vrstev. Ten ale srážel cín ještě v solu.

Další vrstvy kvůli problémům s přípravou a manipulací, a prakticky neměnným výsledkům odporů v řádu jednotek až desítek MΩ již nebyly dopovány fluorem. Náhradou se stal antimon.

Kompozice č. 8, 9 a 10 byly připraveny stejně jako předešlé²¹, jen s rozdílem prostředí rozpouštědla. Pro tisk, ke kterému jsme směřovali, byl ethanol a isopropanol nevhodnou volbou, vzhledem k nízké viskozitě a silné těkavosti. Nebyly zjištěny rozdíly vodivostních nebo optických vlastností při použití alkoholů a tak pro další postupy byl použit už pouze isobutanol.

Kompozice č. 11²³ byla připravena úplně jiným postupem, který využívá organické prekurzory. Ty jsou snáze tepelně rozložitelné, což vedlo ke značnému zlepšení vodivosti připravovaných vrstev.

Roztok 5 ml 0,282 molárního isopropoxidu cíničitého byl dopován propoxidem antimonitým do 3 % (at.) Sb/Sn. Do roztoku byl přidán TEA v molárním poměru 1:1 (Sn:TEA). Roztok byl míchán 1,5 h. Poté byla do něj přikapávána směs deionizované vody a isopropoxidu v objemovém poměru 1:3 resp. dokud se nedosáhlo molárního poměru 2:7 (TEA:H₂O). Sol byl míchán 2 h.²³

Vrstvy byly připravovány nanášením pomocí spincoatingu při ve dvou po sobě jdoucích krocích 6 s při otáčkách 1000 min⁻¹ a 20 s při otáčkách 2000 min⁻¹. Mezi nanášením vrstev proběhlo sušení při 300 °C a nakonec kalcinace při 600 °C.

Bylo dosaženo snížení elektrického odporu na řád stovek kΩ/sq.

Pro další zlepšení vlastností byly připraveny a změřeny vzorky, které se byly páleny po každém nanesení a po dvou vrstvách.

Tato kompozice byla použita i pro několik dalších experimentů, s přidavkem PEG, který měl omezit coffeering efekt, což je vyplavování a následné hromadění vzorku na okraji natištěných kapek. PEG ale zapříčinil značné zhoršení elektrických vlastností a bylo od něj upuštěno.

Další experiment zkoumal různé druhy substrátů, konkrétně vliv sodnovápenatého a pyrexového skla. Bylo zjištěno, že odpor nanesených vrstev na pyrexových sklech se pohyboval na úrovni jednotek kΩ/sq.

Pro zvýšení tloušťky vrstev byl připraven sol dvakrát koncentrovanější, ale při dodržení poměrů při přípravě došlo ke srážení složek již při přípravě, takže od tohoto experimentu bylo upuštěno. Díky využití pyrexových skel byl proveden experiment určující závislost elektrického odporu na teplotě kalcinace, po kterém došlo k navýšení kalcinační teploty ze 450 °C na 600 °C.

Kompozice č. 12 používá alternativní prekurzor antimonu, který bylo nutno v průběhu práce dokoupit a původní propoxid již v nabídce nebyl. Vzorky mají srovnatelné vlastnosti jako ty z kompozice č. 11.

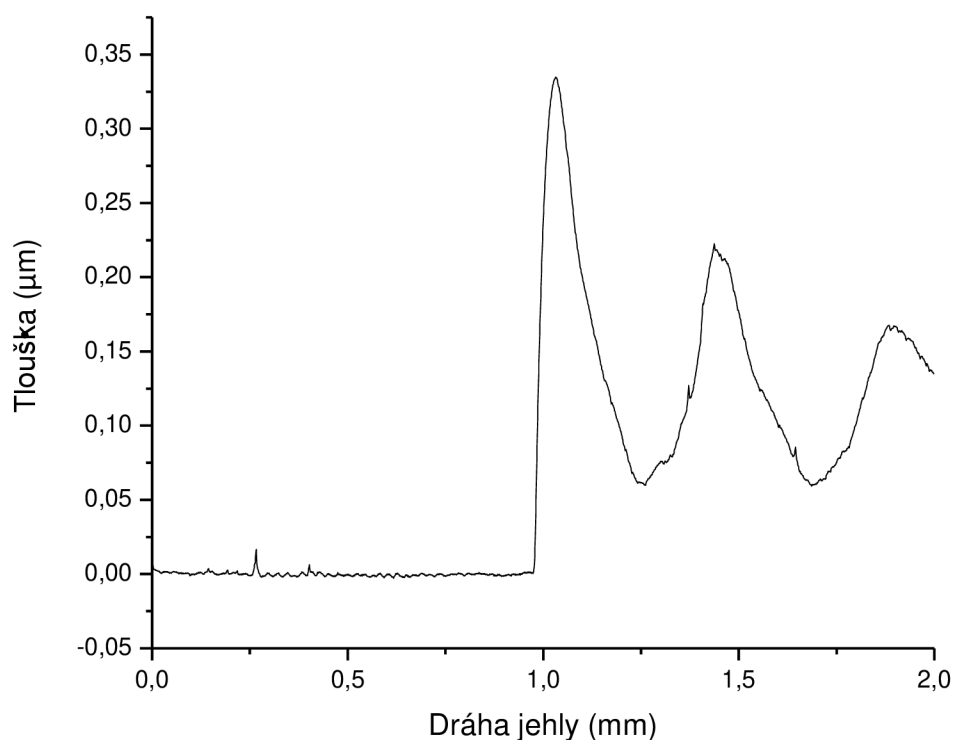
Tato kompozice byla spinována a tištěna. Byly připraveny sady vzorků v rozsahu 1-4 vrstvy spinované na pyrexovém skle, 1-5 vrstev tištěných na sodnovápenatém skle a 1-4 vrstvy tištěné na pyrexovém skle. Tištěné vzorky byly ještě rozděleny podle teploty substrátu na 25 °C a 50 °C. Tisk probíhal pomocí 16 a 2 trysek a pyrexové skla byly páleny při 450 °C a 600 °C. Sodnovápenaté skla jen při 450 °C. Vzorky byly změřeny profilometricky a čtyřbodovou sondou. Pyrexové vzorky ve 4 vrstvách při 450 °C a 600 °C tištěné 2 tryskami byly podrobeny rentgenové difrakci a vzorky kalcinované při 450 °C, tištěné 2 tryskami byly analyzovány rastrovou elektronovou mikroskopií.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

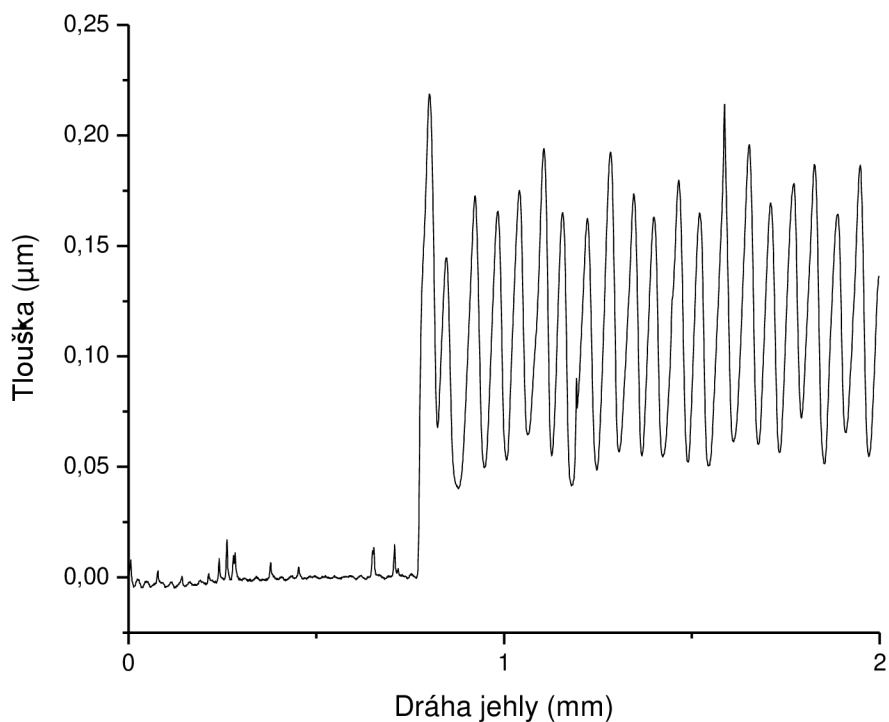
V přípravné fázi byly otestovány různé kompozice využívající fluoru nebo antimonu jako dopovaného prvku (kompozice 1 – 10). Protože v této fázi nebyly získány uspokojivé a reprodukovatelné výsledky z hlediska elektrické vodivosti, nejsou zde získané data uvedena ani diskutována.

Teprve kompozice 11 resp. 12 poskytla dostatečnou vodivost, proto jsou výsledky s ní naměřené detailně popsány v této kapitole

4.1 Profilometrické měření

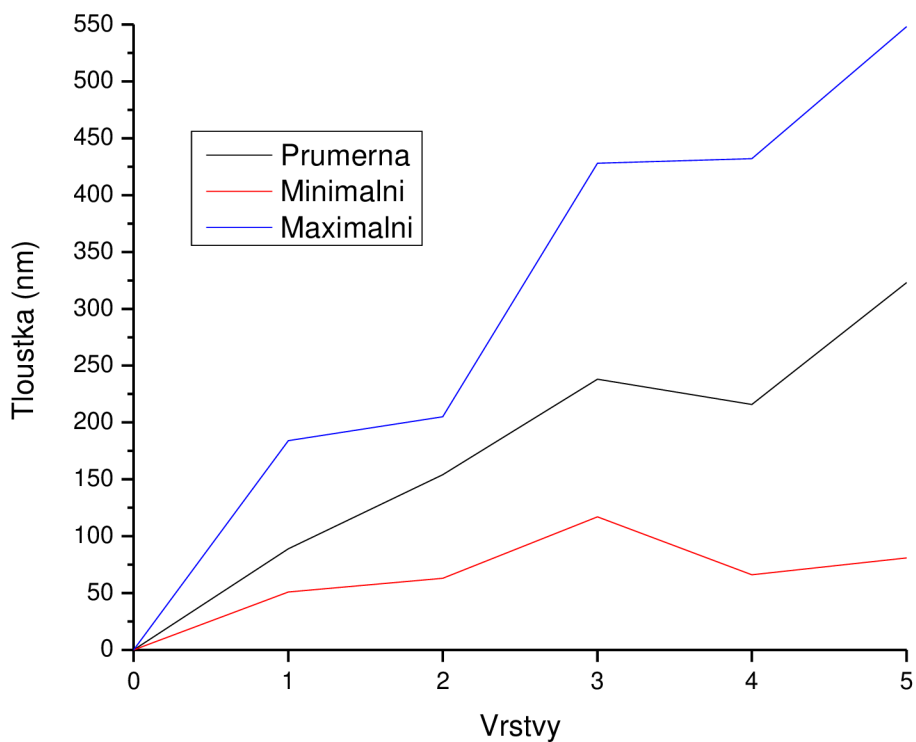


Obrázek 9: Profil pyrexového skla 2 vrstvy 16 trysek

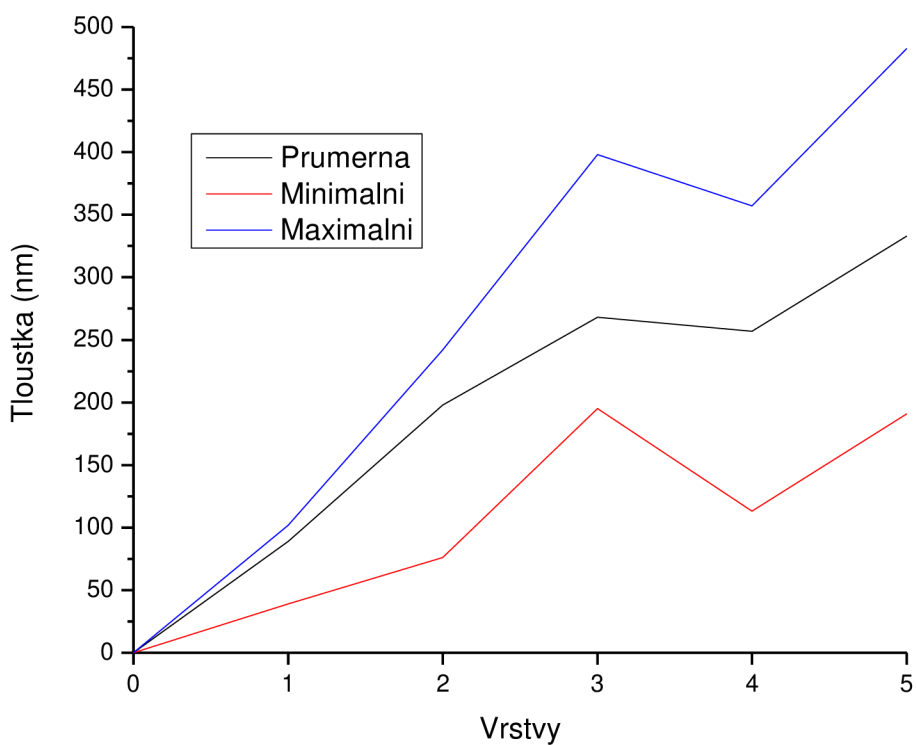


Obrázek 10: Profil pyrexového skla 2 vrstvy 2 trysky

Obrázek 9 resp. Obrázek 10 jsou změřené profily vzorků nanesených na pyrexovém skle ve 2 vrstvách, páleny při 450 °C a tištěné 16 resp. 2 tryskami. Měření probíhalo příčně ke směru tisku. Na začátku měření je vždy vidět povrch samotného substrátu. Na těchto profilech je vidět, že vrstvy jsou výškově nehomogenní. V případě 16 trysek jsou vidět pásy kroků tiskové hlavy ohraničené nahromaděným vzorkem i pouhým okem. Při tisku 2 tryskami jsou tyto pásy nahuštěny blíž k sobě a vizuálně jsou téměř potlačeny. Tyto hranice jsou v grafech vyznačeny jako píky. Měřené tloušťky jsou pak zprůměrované hodnoty. Nahuštění na okrajích je způsobeno cofeering efektem.



Obrázek 11: Tloušťka vzorků v závislosti na počtu vrstev, sodnovápenaté sklo 16 trysek

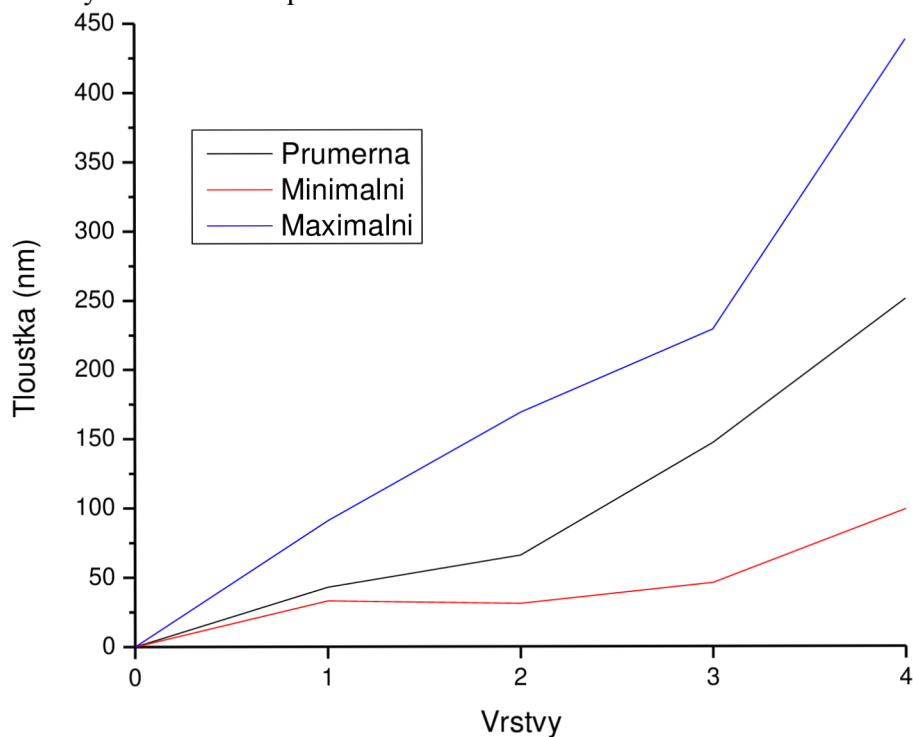


Obrázek 12: Tloušťka vzorků v závislosti na počtu vrstev, sodnovápenaté sklo 2 trysky

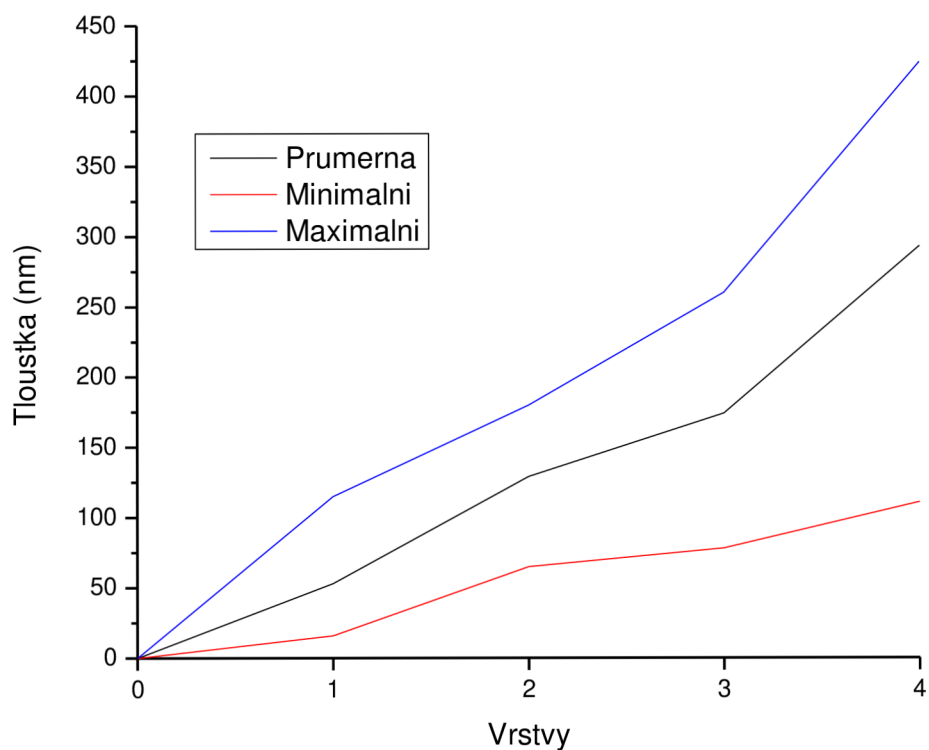
Obrázek 11 Ukazuje závislost tloušťky vzorků na počtu nanesených vrstev, přičemž červená linka je minimální naměřená tloušťka, modrá linka je maximální naměřená tloušťka a černá je průměrná hodnota.

Obrázek 12 ukazuje závislost tloušťky v závislosti na počtu nanesených vrstev. Odtud je patrné, že průměrná tloušťka je díky menšímu počtu použitých trysek a tím pádem koncentrace píků než v předešlém případě.

Oba dva vzorky obsahovaly velké množství anomálií v tloušťce, takže závislost tloušťky na počtu nanesených vrstev není příliš lineární.



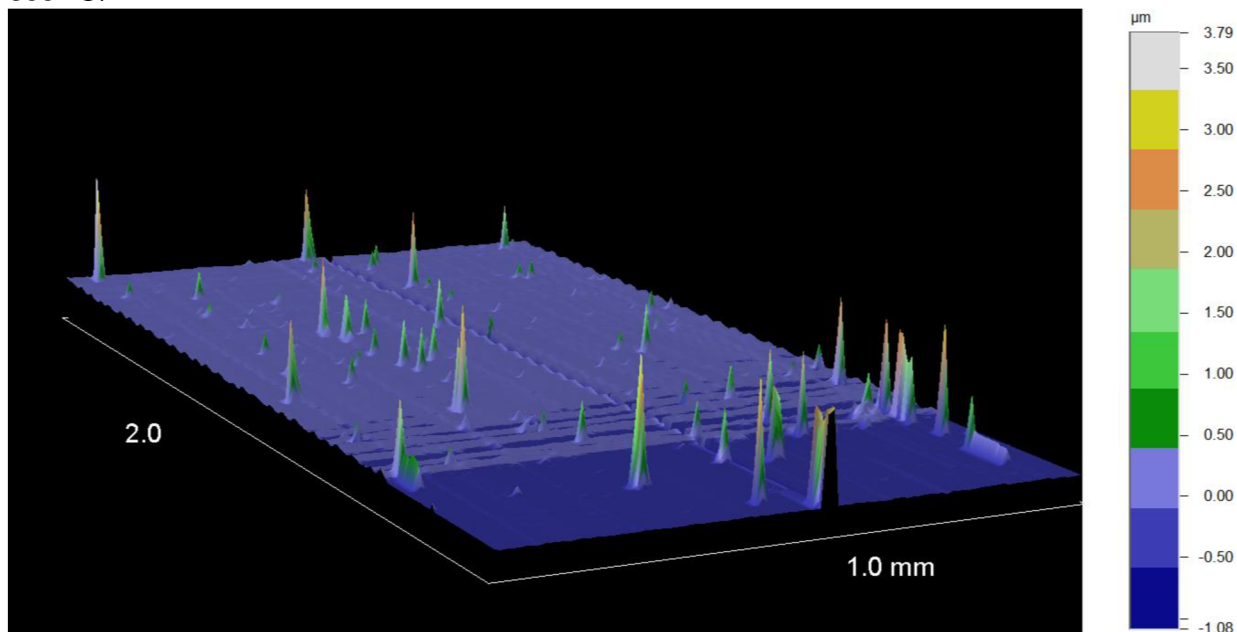
Obrázek 13: Tloušťka vzorků v závislosti na počtu vrstev pyrexové sklo 16 trysek



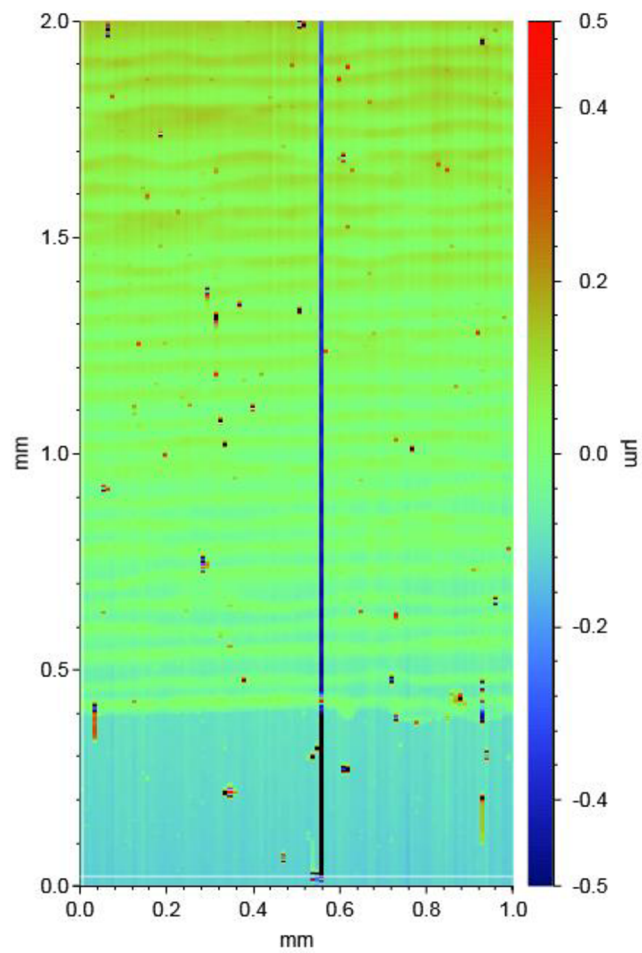
Obrázek 14: Tloušťka vzorků v závislosti na počtu vrstev, pyrexové sklo 2 trysek

Obrázek 13 a Obrázek 14 jsou pak obdobné závislosti jako v předešlých případech, jen na pyrexovém skle. I zde je vidět posun průměrné hodnoty tloušťky vrstvy mezi tiskem 16 a 2 tryskami. Pyrexové skla navíc neobsahovaly tolik nepravidelností v tloušťkách vrstev a tak jsou závislosti mnohem lineárnější než v případě sodnovápenatých skel.

Na následujících obrázcích (Obrázek 15 resp. Obrázek 16) jsou 3D model resp. 2D mapa vzorku, na níž je vymodelována topografie povrchu vzorku. Na nich, zejména pak na 2D mapě jsou viditelné pásy, kudy se při tisku pohybovala tisková hlava. Použitý vzorek pro tyto obrázky byl tištěný dvěma tryskami při teplotě substrátu 25 °C a kalcinovaný při 600 °C.

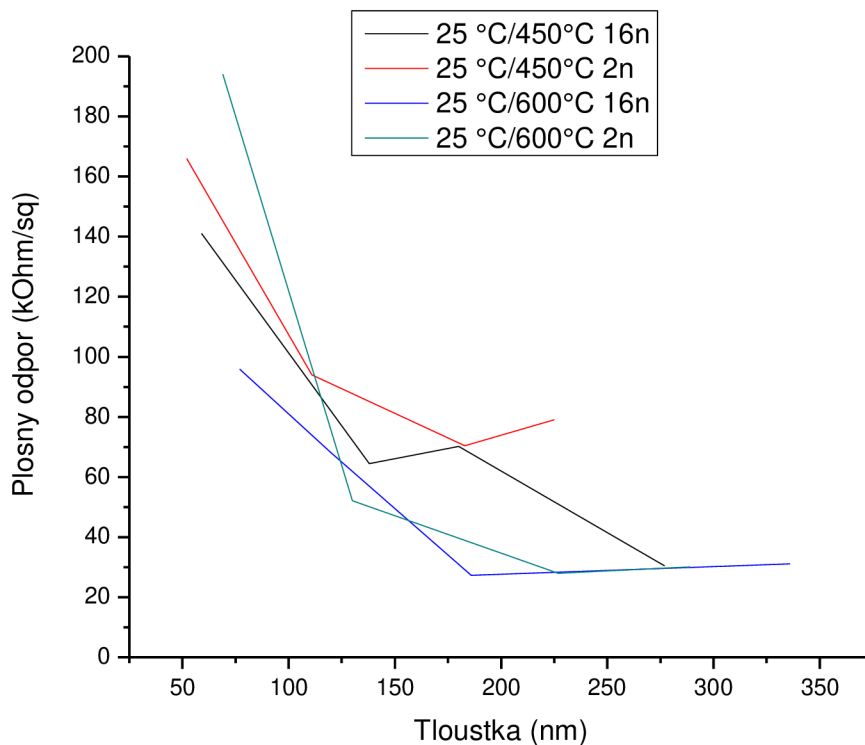


Obrázek 15: 3D profilometrický model

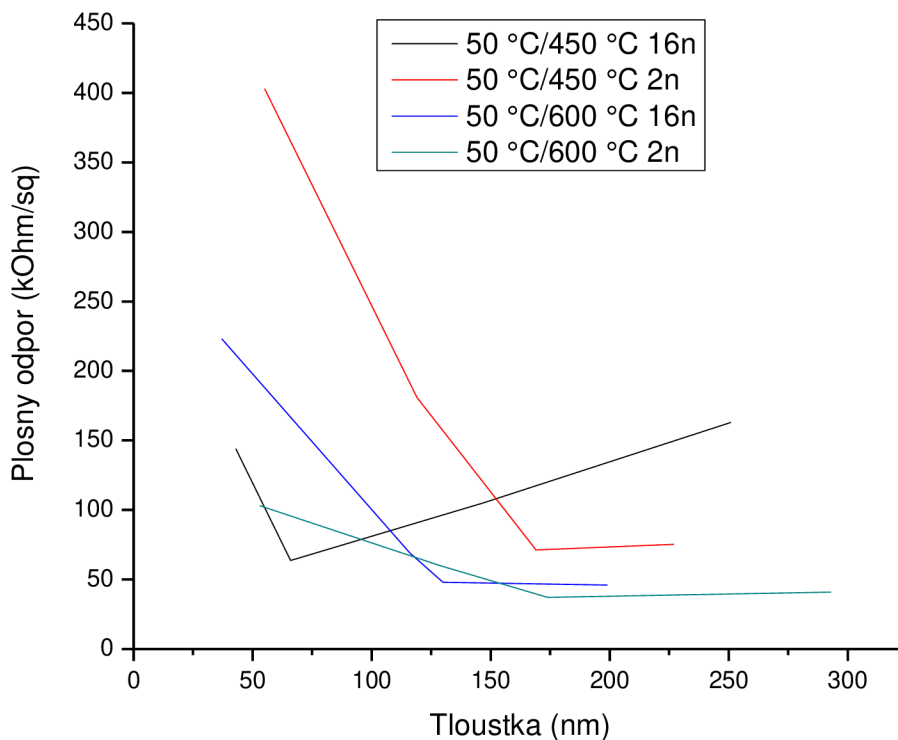


Obrázek 16: 2D mapa

4.2 Čtyřbodová sonda



Obrázek 17: Závislost odporu na tloušťce vrstvy, pyrex, nanášen při 25 °C



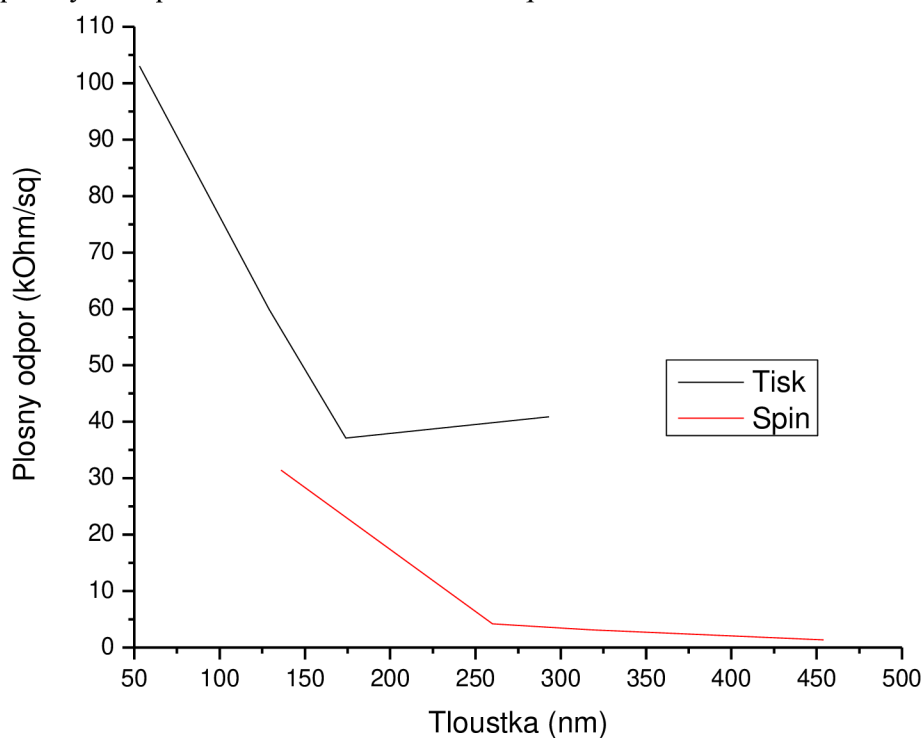
Obrázek 18: Závislost odporu na tloušťce vrstvy, pyrex, nanášen při 50 °C

Obrázek 17 resp. Obrázek 18 pak ukazuje závislost plošného odporu na tloušťce připravených vrstev pro pyrexové vzorky, které byly tištěny na substrát teploty 25 °C resp. 50 °C. Z grafů lze porovnat působení kalcinační teploty na tištěné vzorky, kdy černá

a červená náleží vždy teplotě kalcinace 450 °C, a modrá a zelená náleží vzorkům kalcinovaným při 600 °C.

Při vysokých tloušťkách lze pozorovat navýšení odporu vůči předchozím hodnotám. Tento jev je způsoben nejspíš příliš vysokou tloušťkou xerogelu vytvořeném na substrátu. Během kalcinace pak může dojít k praskání vrstev při spalování zbytku organiky a samotnému rozkladu organických prekurzorů na anorganické oxidy. Tento jev byl současně pozorován i na vzorcích připravených metodou spincoating. Ty se musely kalcinovat po nanesení každé sudé vrstvy, aby se tomuto jevu zamezilo. Při tisku je však nemožné vrátit po kalcinaci substrát na přesně stejné místo a hrany tisku by byly neostré, proto tento proces nebylo možné aplikovat.

Vlastnosti těchto vrstev zatím nedosahují kvalit komerčně zakoupených FTO skel. Nejlepší komerčně dostupné FTO skla mají odpor v rozsahu 7 – 13 Ω/sq .²⁴ Pro nás dostupné skla jsou připravované sprejovou pyrolýzou a tloušťky oxidu cíničitého se pohybují v řádech μm . Další srovnání lze provést s komerčními ITO vrstvami nanášenými na PET fólii, které dosahují plošných odporů v rozsahu 45 – 300 Ω/sq .²⁵



Obrázek 19: Srovnání tištěných a spinovaných vrstev

Obrázek 19 ukazuje srovnání vzorků tištěných a vrstev spinovaných, které byly kalcinovány po dvou cyklech nanášení. Z něj lze zjistit, že spinované vrstvy dosáhly lepších elektrických vlastností. Jejich tloušťka je ale mnohem vyšší, než se nám podařilo dosáhnout při tisku.

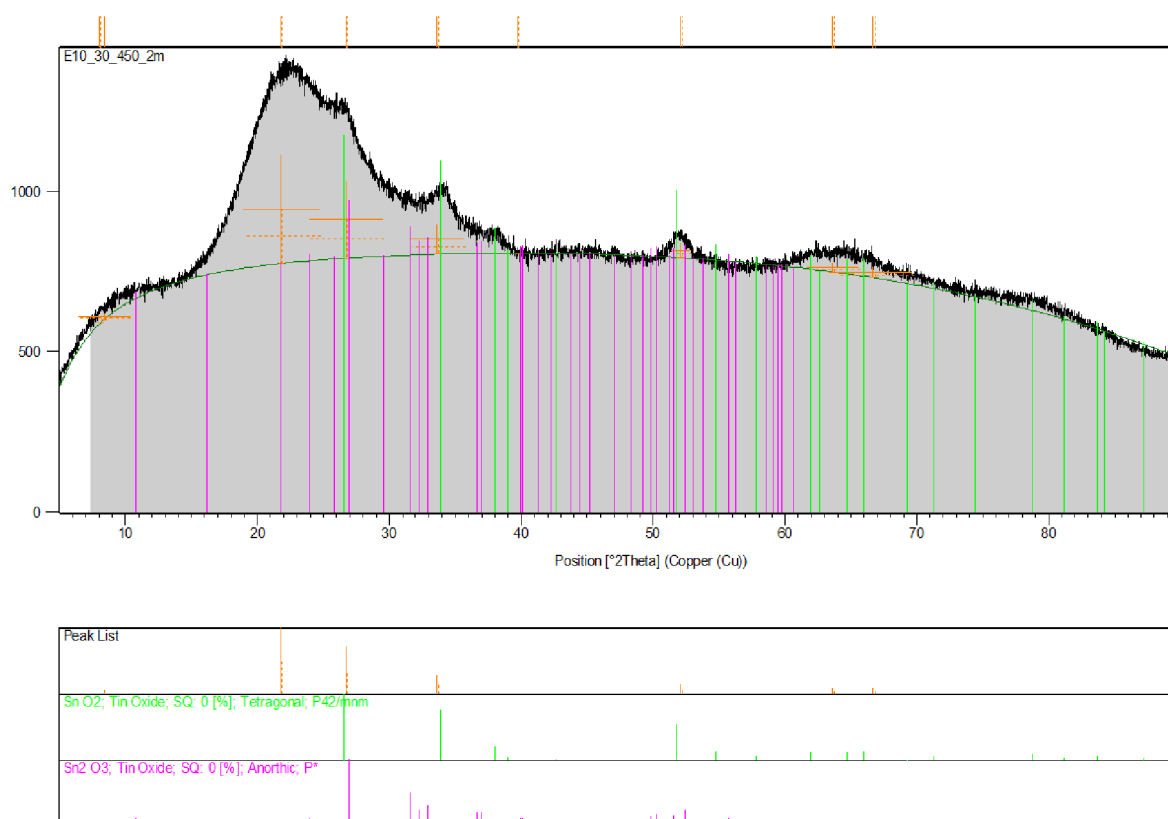
Tabulka 2: Naměřené data spinovaných vrstev

Kalcinováno po každé vrstvě		Kalcinováno po 2 vrstvách		Kalcinováno jednou	
Tloušťka (nm)	Odpor (Ω/sq)	Tloušťka (nm)	Odpor (Ω/sq)	Tloušťka (nm)	Odpor (Ω/sq)
133	13493	136	31408	129	15353
252	5886	260	4177	266	3203
321	2295	317	3153	322	---
470	1350	454	1336	460	---

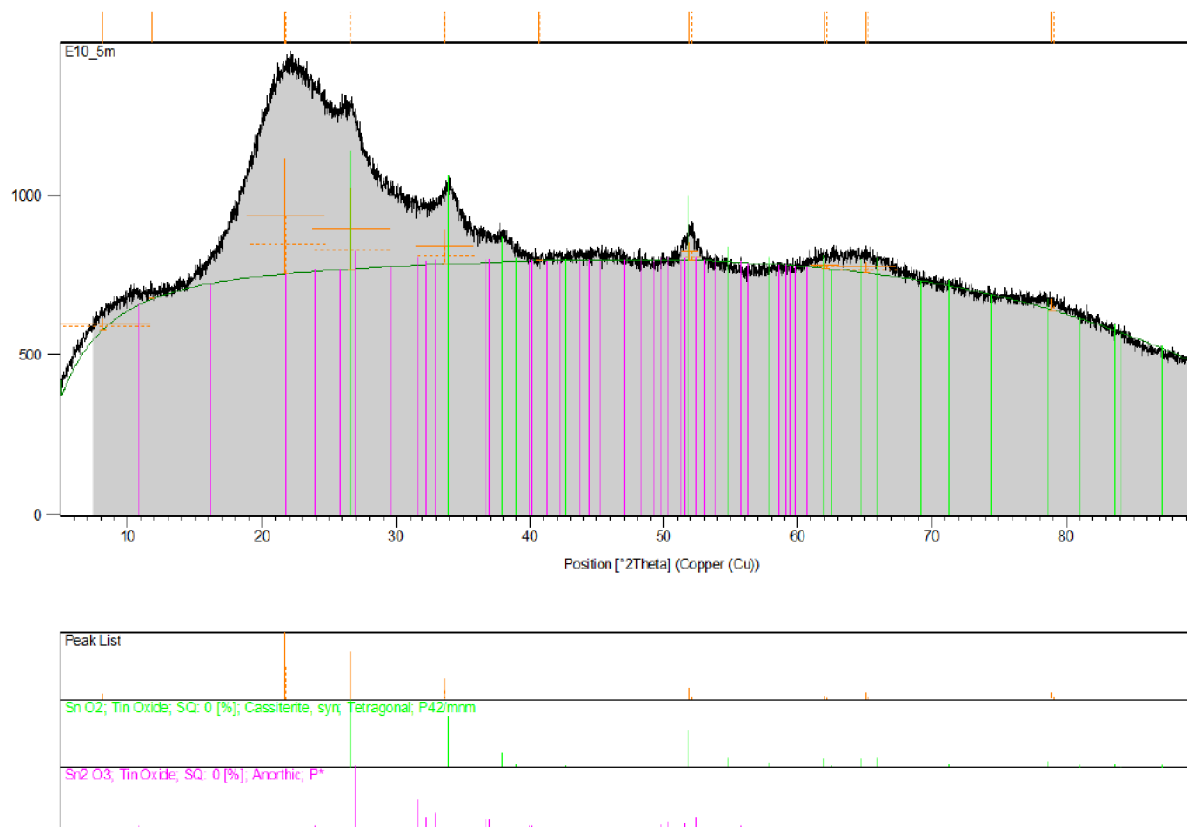
V tabulce (Tabulka 2) jsou zaznamenána data změřená na spinovaných vzorcích na pyrexových sklech. Pro tři a čtyři vrstvy vzorků kalcinovaných až na konci procesu nebyly změřeny odpory, protože odpor vrstev ležel mimo měřitelnou oblast přístroje. Na povrch těchto vzorků byl viditelně rozpraskaný a zakalený.

4.3 XRD analýza

Vzorek kalcinovaný při 600 °C vykazuje mírně ostřejší píky, než vzorek kalcinovaný při 450 °C, což lze vyhodnotit jako vyšší krystalinitu v případě vyšší teploty. Vrstvy na substrátu jsou však velice tenké a tak většina odezvy je substrát, který je ze samotné podstaty skla amorfni. Takže spektrum vykazuje silnou amorfnost měřeného vzorku. Obrázek 20 je spektrum změřené na ATO vzorku ve 4 vrstvách na pyrexovém skle kalcinovaný při 450 °C a Obrázek 21 spektrum tohož vzorku, ale kalcinovaný při 600 °C.



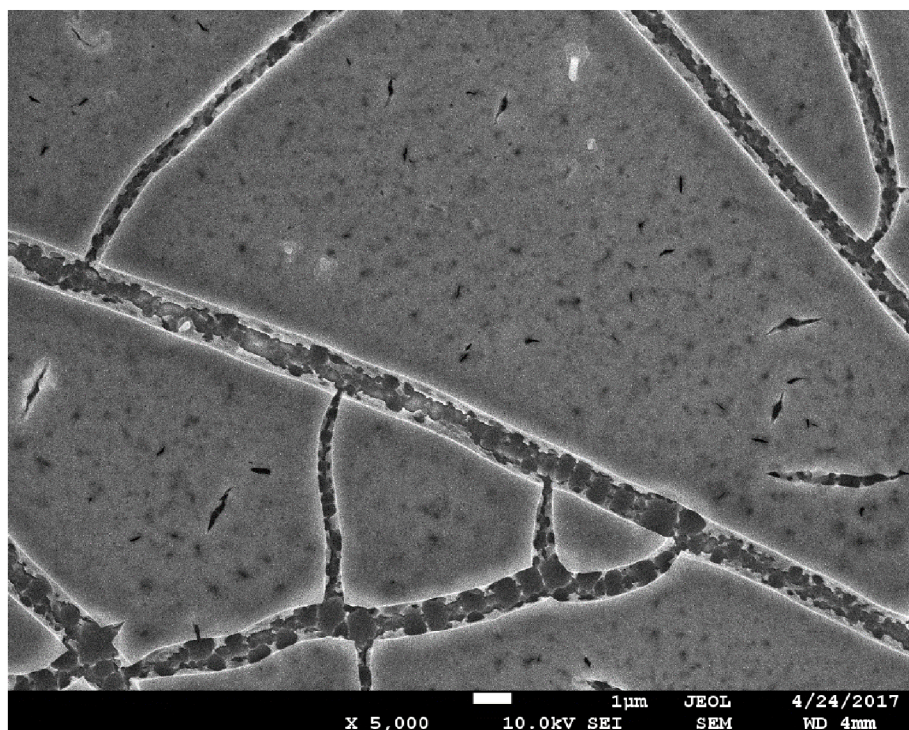
Obrázek 20: Záznam z XRD pyrexového skla kalcinovaného při 450 °C



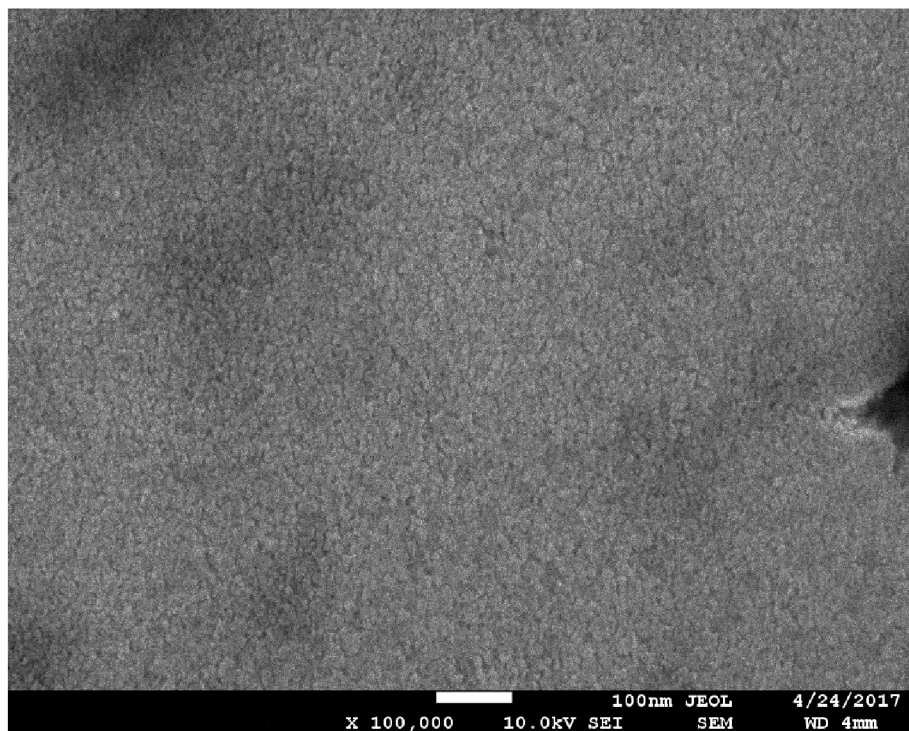
Obrázek 21: Záznam z XRD pyrexového skla kalcinovaného při 600 °C

4.4 SEM analýza

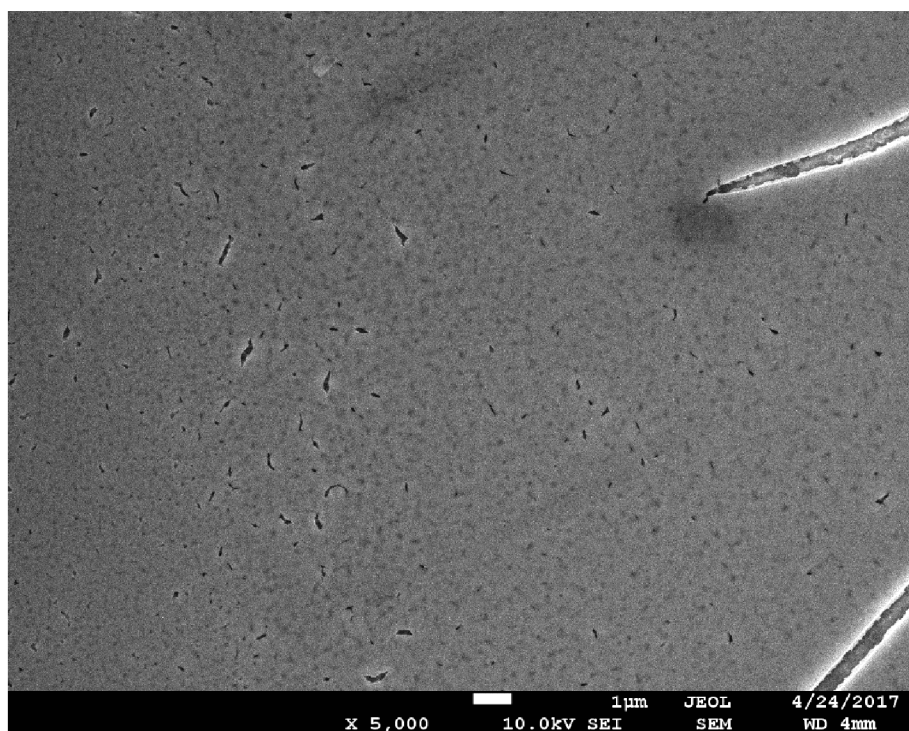
Obrázek 22 a Obrázek 23 jsou snímky vzorků ATO tištěných na sodnovápenaté sklo při 5 000 resp. 100 000 násobném zvětšení. Obrázek 24 a Obrázek 25 jsou pak snímky při témž zvětšení vzorků tištěných na pyrexové sklo. Z vyššího zvětšení je patrné, že oba vzorky mají podobný hladký povrch a v místě neobsahujících praskliny jsou prakticky totožné. Při menším zvětšení lze pozorovat rozpraskanou vrstvu v případě obou druhů skel, přičemž sodnovápenaté sklo má vrstvu popraskanou mnohem více, než sklo pyrexové. To mohlo být důvodem nemožnosti změřit odpor vzorků na sodnovápenatém skle. Tyto praskliny mohou vznikat během procesu kalcinace, kdy sodnovápenaté sklo má mnohem vyšší tepelnou roztažnost a při zvyšování teploty dojde k potrhání xerogelu vzniklého při vysušení vrstvy. Na pyrexovém substrátu jsou také patrné praskliny, ale jsou mnohem menší a je jich méně.



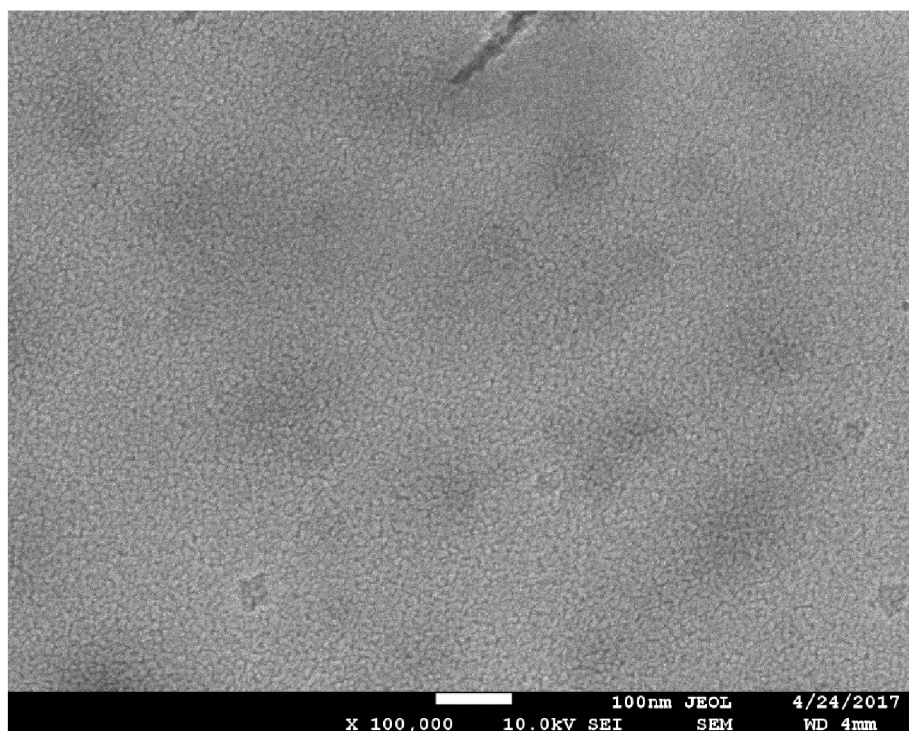
Obrázek 22: SEM snímek ATO na sodnovápenatém skle 5 000x zvětšené



Obrázek 23: SEM snímek ATO na sodnovápenatém skle 100 000x zvětšené



Obrázek 24: SEM snímek ATO na pyrexovém skle 5 000x zvětšené



Obrázek 25: SEM snímek ATO na pyrexovém skle 100 000x zvětšené

Tabulka 3 zobrazuje prvkové složení vzorků získaných vyhodnocením detekcí zpětně odražených elektronů. Z hodnot je patrné, že pyrexový vzorek obsahuje mnohem méně sodíku a nebyl v něm detekován vápník. Obsah sodíku ve vrstvě může mít také vliv na měřený odpor. Nanesená vrstva je ale velice tenká a vzhledem k detekci křemíku je jisté, že přístroj částečně měřil i samotný substrát, ve kterém se křemík, hořčík i sodík vyskytuje. Po kalcinaci došlo k mírné ztrátě obsahu antimonu ve výsledném vzorku z původních ~ 3 % na 2,2 – 2,4 at. %.

Tabulka 3: Prvkové složení vzorků

Prvek	NaCa at. %	Pyrex at. %
C	5,06	4,00
O	63,13	48,87
Na	4,99	0,95
Mg	1,01	0,41
Si	14,36	14,86
Fe	0,00	0,06
Cl	0,53	0,00
Ca	1,31	0,00
Sn	9,40	10,58
Sb	0,21	0,26

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo připravit kompozici pro přípravu tenkých vrstev oxidu cínitého, která by byla vhodná pro materiálový tisk na inkjetové tiskárně Dimatix.

Bylo připraveno 12 základních kompozic, ze kterých vycházely další odvozené kompozice s různými koncentracemi prekurzorů. Z toho byla nakonec pro detailní analýzu a měření použita 1 poslední, která v předběžné fázi práce poskytla nejlepší hodnoty elektrické vodivosti. Sledovanými parametry byla transparentnost připravených tenkých vrstev, jejich odpor a homogenita tloušťka vrstev.

Odpor připravených vrstev byl měřen pomocí čtyřbodové sondy a tloušťka vrstev byla měřena kontaktním profilometrem.

Byl testován vliv substrátu na elektrický odpor. Použité substráty byly sodnovápenaté mikroskopické skla pyrexové skla. Bylo zjištěno, že sodnovápenaté skla nejsou vhodným substrátem pro přípravu, pomocí spincoatingu nebo inkjetového tisku. Nejspíš kvůli jejímu součinu tepelné roztažnosti docházelo při kalcinaci rozpraskání vrstvy na separované fragmenty, které mezi sebou elektrický proud nevedí. Možný vliv na elektrický odpor vrstev mohly mít i sodné nebo vápenaté ionty obsažené v substrátu, které mohly difundovat do vrstvy. Pyrexové skla byla se svým mnohem nižším součinitelem teplotní roztažnosti a absencí obou dříve zmíněných iontů vhodnější substrát. Měřené odpory byly při stejných podmínkách nanášení až o dva řády lepší. Pyrexové sklo také umožnilo navýšit kalcinační teplotu ze 450 °C na 600 °C, což vedlo k dalšímu vylepšení elektrických vlastností.

Vzorky na pyrexovém skle tištěné za stejných podmínek a kalcinované při 450 °C a 600 °C byly proměřeny na XRD. Přestože tloušťka vrstev byla velmi nízká a velkou část odezvy difraktometru odpovídalo podkladovému substrátu, bylo ze získaného spektra možné porovnat šířku píků, které v případě vyšší teploty byly užší. Lze tedy odvodit, že vrstvy pálené při vyšší teplotě mají vyšší krystalinitu, což může být důvod zlepšení elektrických vlastností.

Vzorky na sodnovápenatém a pyrexovém skle, tištěné a kalcinované za stejných podmínek byly analyzovány pomocí SEM. Pořízené snímky dokazují tvrzení, že vrstvy na sodnovápenatém skle jsou čteně rozpraskané, pravděpodobně kvůli tepelné roztažnosti materiálu. V případě pyrexových skel byly praskliny přítomny také, ale v menší četnosti a méně rozsáhlé. Snímky, také ukázaly, že připravené solgelové vrstvy jsou až na zmíněné praskliny hladké a homogenní. Vzorky byly také podrobeny elementární analýze, která potvrdila, že ve vrstvě zůstal i dopovaný antimon v přibližném složení mezi 2,2–2,4 at.% Sb/Sn. Analýza také zaznamenala obsah sodíku a vápníku ve vzorku na sodnovápenatém skle. Vrstvy jsou však velmi tenké a tak nebylo možné určit, jestli jsou tyto prvky pouze v substrátu nebo jsou obsaženy i ve vrstvě samotné. V pyrexovém skle pak byla zaznamenána přítomnost železa a sodík byl detekován jen ve čtyřikrát menší míře.

6 CITACE

1. Banerjee AN, Kundoo S, Saha P, Chattopadhyay KK. Synthesis and characterization of nano-crystalline fluorine-doped tin oxide thin films by sol-gel method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2003;28(1):105-110.
2. Hecht DS, Hu L, Irvin G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures. *Advanced Materials*. 2011;23(13):1482-1513.
3. Tadatsugu M. Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes. *Semiconductor Science and Technology*. 2005;20(4):S35.
4. Makhlof ASH, Tiginyanu I. Nanocoatings and Ultra-Thin Films - Technologies and Applications. In: Woodhead Publishing.
5. Hall DB, Underhill P, Torkelson JM. Spin coating of thin and ultrathin polymer films. *Polymer Engineering and Science*. 1998;38(12):2039-2045.
6. SolGel_SpinCoating. In: SolGel_SpinCoating.jpeg, ed. Vol 339,77 KB. San Francisco (CA): Wikipedia: the free encyclopedia [online]; 2013.
7. Kim C, Kim JT, Kim KS, Jeong S, Kim HY, Han YS. Immobilization of TiO₂ on an ITO substrate to facilitate the photoelectrochemical degradation of an organic dye pollutant. *Electrochimica Acta*. 2009;54(24):5715-5720.
8. Perednis D, Gauckler LJ. Thin film deposition using spray pyrolysis. *Journal of Electroceramics*. 2005;14(2):103-111.
9. Stančík J. *Degradace inkoustových výtisků*. Brno: Ústav fyzikální a spotřební chemie, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická; 2010.
10. PANÁK J, DVONKA V, ČEPPAN M, et al. *Polygrafické minimum*. 2. ed. Bratislava: TypoSet; 2000.
11. Dutrow BL, Clark CM. X-ray Powder Diffraction (XRD). http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html.
12. Difrakce rentgenového záření. http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/rtg_difrakce/4.html.
13. Trojek J. *Optická odezva silně legovaného křemíku v infračerveném oboru*. Brno, Masarykova Univerzita v Brně; 2007.
14. encyclopedia Wtf. Four-terminal sensing. 2001-; http://en.wikipedia.org/wiki/Four-terminal_sensing.
15. Sheet Resistance and the Calculation of Resistivity or Thickness Relative to Semiconductor Applications. <http://four-point-probes.com/sheet-resistance-and-the-calculation-of-resistivity-or-thickness-relative-to-semiconductor-applications/>.
16. 2000px-Mechanical_filtering_of_surface_finish_trace.svg. In: 2000px-Mechanical_filtering_of_surface_finish_trace.svg.png, ed. Wikipedia: the free encyclopedia: Wikipedia Foundation; 2001-.
17. Instruments N. How a Profilometer Works. <http://www.nanoscience.com/technology/optical-profiler-technology/how-profilometer-works/>. Accessed 3.5.2017.
18. Industry PaC. pci0813-Nanovea-F1-615. In: Paint and Coating Industry.
19. Instruments N. Scanning Electron Microscopy. <http://www.nanoscience.com/technology/sem-technology/>.
20. Schweitzer J. Scanning Electron Microscope. <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm>. Accessed 4.5.2017.

21. Tadanaga K, Owan T, Morinaga J, Urbanek S, Minami T. Fine patterning of transparent, conductive SnO₂ thin films by UV-irradiation. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2000;19(1-3):791-794.
22. Senthilkumar V, Vickraman P, Ravikumar R. Synthesis of fluorine doped tin oxide nanoparticles by sol-gel technique and their characterization. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 2010;53(2):316-321.
23. Takahashi Y, Wada Y. DIP-COATING OF SB-DOPED SnO₂ FILMS BY ETHANOLAMINE-ALKOXIDE METHOD. *Journal of the Electrochemical Society*. 1990;137(1):267-272.
24. Fluorine doped Tin Oxide (FTO) Glass. <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=106837645>.
25. Indium tin oxide coated PET. <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/indiumtinoxidecoatedpet1234598765?lang=en®ion=CZ>.

7 SEZNAM ZKRATEK

AcAc	acetylaceton
ATO	antimonem dopovaný oxid cíničitý
CS	continual stream
CVD	chemical vapour deposition, chemické napařování
DOD	drop on demand
EtOH	ethanol
F ₁₆ C ₁₀	2,2,3,3,4,4,5,5,6,6,7,7,8,8,9,9-hexadecafluorodekan-1,10-diol
FTO	fluorem dopovaný oxid cíničitý
iBuOH	isobutylalkohol
iPrOH	isopropylalkohol
MeOH	methanol
PVD	physical vapour deposition, fyzikální napařování
SEM	scan elektron microscopy, rastrovací elektronová mikroskopie
TCO	transparent conductive oxides, transparentní vodivé oxidy
TEA	triethanolamin
XRD	X-Ray diffraction, rentgenová difrakce