

# Příprava ZnO sub-mikro a nanostruktur

Milan Masař

---

Bakalářská práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Milan MASAR**  
Osobní číslo: **T10856**  
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Příprava ZnO sub-mikro a nanostruktur**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární rešerši na téma práce, hydrotermální syntéza ZnO
2. Na základě rešerše zvolit metodu přípravy a provést prvotní studii proveditelnosti dané syntézy a charakterizace produktů.
3. Diskuse výsledků a formulace závěru.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] Jagadish C, Pearton SJ. Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures : processing, properties and applications. Amsterdam ; London: Elsevier; 2006.

[2] Baruah S, Dutta J. Hydrothermal growth of ZnO nanostructures. Sci Technol Adv Mater. 2009;10.

[3] Moezzi A, McDonagh AM, Cortie MB. Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications. Chemical Engineering Journal.185:1-22.

[4] Hsieh, C.T., J.Y. Lin, and S.Y. Yang, Low temperature growth of ZnO nanorods on flexible polymeric substrates. Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures. 42(9): p. 2319-2323.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Machovský**  
Centrum polymerních materiálů

Datum zadání bakalářské práce: **11. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*děkan*



  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 28.5.2013

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem předkládané práce je poskytnout stručný přehled ZnO sub-mikro a nanostruktur, důraz je pak kladen na pěstování nanodrátů oxidu zinečnatého na substrátech. V teoretické části je poskytnuta motivace pro syntézu takových struktur a jsou shrnuty metody, které je možno k růstu nanodrátů použít. Na základě rešerše byla vybrána nízkoteplotní hydrotermální syntéza jako vhodná pro běžné laboratorní podmínky a byly vypěstovány ZnO nanodráty na PET folii potažené ITO. Připravená struktura byla charakterizována metodou skenovací elektronové mikroskopie a rentgenové difrakční analýzy.

Klíčová slova: ZnO, nanodráty, hydrotermální syntéza

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to give a brief overview of ZnO sub-micro and nanostructures especially with emphasis on the growth of zinc oxide nanorods onto substrates. In theoretical part, zinc oxide structure and properties mentioned in context with application areas warranted interest in its synthesis routes that have been described in more details. Special attention has been paid to low-temperature hydrothermal process which enables growth of ZnO nanowires onto polymeric substrates that are not capable to withstand high temperature dry processes and is suitable for laboratory experiments. The growth of ZnO nanorods was realized onto PET coated ITO in the practical part. The morphology of prepared structure was examined by a Scanning Electron Microscopy and the structure was confirmed by X-ray Diffraction Analysis.

Keywords: zinc oxide, nanowires, hydrothermal synthesis

Touto formou bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Machovskému za jeho odborné vedení, ochotu spolupráce a pomoc při tvorbě tohoto díla. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Miroslavu Pastorkovi za pomoc při rentgenové analýze. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině za podporu a toleranci během let studia.

*„Svoboda bez vzdělání je nebezpečná, vzdělání bez svobody je zbytečné.“*

John Fitzgerald Kennedy

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

ÚVOD.....	10
<b>I</b> <b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
1 <b>ZNO V HISTORICKÉM KONTEXTU</b> .....	<b>12</b>
2 <b>KRYSTALOVÁ STRUKTURA A VLASTNOSTI ZNO</b> .....	<b>13</b>
2.1    STRUKTURA ZNO .....	13
2.2    VLASTNOSTI ZNO.....	15
2.2.1    Chemické vlastnosti .....	15
2.2.2    Elektrické vlastnosti .....	15
2.2.3    Optické vlastnosti.....	16
2.2.4    Tepelné a mechanické vlastnosti.....	16
3 <b>NANOSTRUKTUROVANÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>17</b>
3.1    ZNO NANOSTRUKTURY.....	20
<b>4</b> <b>PŘÍPRAVA ZNO</b> .....	<b>21</b>
4.1    PRŮMYSLOVÁ VÝROBA.....	21
4.1.1    „Nepřímý“ francouzský proces .....	21
4.1.2    „Přímý“ americký proces .....	21
4.2    PŘÍPRAVA ZNO NA SUBSTRÁTECH.....	22
4.2.1    Suchý proces - „Vapor Phase Synthesis“ .....	22
4.2.2    Mokrý proces – „solution phase synthesis“.....	24
<b>5</b> <b>HYDROTHERMÁLNÍ SYNTÉZA ZNO NANODRÁTŮ</b> .....	<b>26</b>
5.1    SUBSTRÁT .....	26
5.2    ZÁRODEČNÁ VRSTVA.....	26
5.3    PREKURZOR $Zn^{2+}$ .....	27
5.4    PREKURZOR $OH^-$ .....	27
5.5    KONCENTRACE PREKURZORU .....	27
5.6    PH ROZTOKU .....	28
5.7    TEPLOTA .....	28
5.8    ČAS .....	29
5.9    ADITIVA .....	29
<b>6</b> <b>CHARAKTERIZAČNÍ METODY</b> .....	<b>30</b>
6.1    MIKROSKOPICKÁ CHARAKTERIZACE.....	30
6.2    RENTGENOVÁ CHARAKTERIZACE.....	31
<b>II</b> <b>PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>
7 <b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>34</b>



7.1	POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ .....	34
7.2	POUŽITÉ LABORATORNÍ SKLO A OSTATNÍ VYBAVENÍ .....	34
7.3	CHEMIKÁLIE .....	34
7.4	SUBSTRÁT .....	35
7.4.1	PET – polyethylentereftalát .....	35
7.4.2	ITO – indium tin oxide.....	35
7.5	PŘÍPRAVA ZÁRODEČNÉ VRSTVY .....	36
7.6	PŘÍPRAVA PREKURZORŮ .....	36
7.7	HYDROTERMÁLNÍ SYNTÉZA.....	37
7.8	CHARAKTERIZACE VZORKU .....	38
7.9	SEM SNÍMKY VZORKŮ.....	39
7.9.1	Snímky substrátu se zárodečnou vrstvou .....	39
7.9.2	Snímky substrátů po hydrotermální syntéze.....	40
7.10	RENTGENOVÁ CHARAKTERIZACE.....	42
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>49</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>51</b>

## ÚVOD

Oxid zinečnatý (ZnO) je právem považován za jeden z klíčových technologických materiálů současnosti. Má dlouhodobou tradici v plastikářském, gumárenském a farmaceutickém průmyslu, mimoto je pro své optoelektronické a piezoelektrické vlastnosti používán v pokročilých aplikacích, např. LED, solárních celách, FET, nanogenerátorech, nejrůznějších senzorech atd.

V důsledku rozmachu těchto pokročilých aplikací byla v poslední době věnována značná pozornost přípravě nejrůznějších ZnO sub-mikro a nanostruktur. V tomto ohledu je ZnO považován za jeden z nejbohatších, co se týče počtu a rozmanitosti těchto struktur. Zvláštní postavení mají 1-D strukturované nanodrátů, pěstované na vhodných substrátech, splňují nejlépe požadavky kladené na tyto aplikace. Pro růst nanodrátů bylo použita, resp. inovována spousta metod; v principu je můžeme rozdělit na „suché“, a „mokrě“ procesy. Mokrě procesy umožňují rozšířit přípravu ZnO nanodrátů na substráty, které jinak při suchých procesech degradují, zejména pak na substráty polymerní.

Předkládaná práce se v teoretické části bude věnovat struktuře, vlastnostem a využití ZnO. Budou obecně shrnuty metody přípravy ZnO nanodrátů a nanostruktur, detailněji se prodiskutuje hydrotermální syntéza, a to včetně parametrů které mají na růst nanodrátů vliv. Na základě rešerše se vyberou optimální podmínky procesu růstu a provede se syntéza ZnO nanodrátů na PET substrátu potaženého ITO vrstvou.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZNO V HISTORICKÉM KONTEXTU

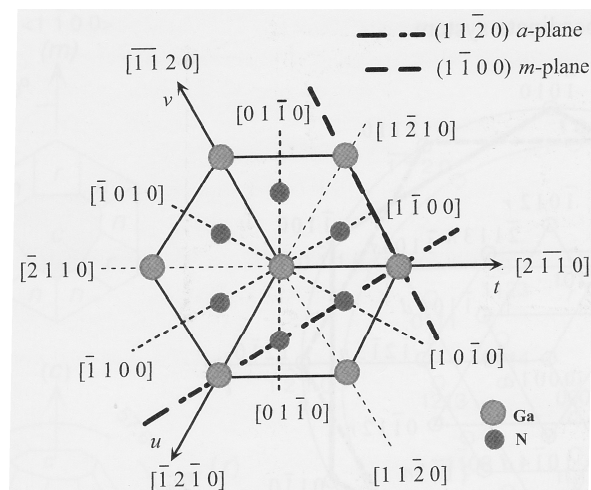
Oxid zinečnatý (ZnO) je pro své jedinečné fyzikálně-chemické vlastnosti dlouhodobě považován za významný technologický materiál. Historicky je jeho používání datováno do doby asi 200 let před naším letopočtem, kde vznikal ZnO na stěnách pecí jako vedlejší produkt při výrobě mosazi tavením zinkové a měděné rudy starými římany. Bílý prášek byl dále čištěn a přidáván do masť a balzámů k léčení nejrůznějších kožních onemocnění. Kalamínové preparáty (oxid zinečnatý s 0,5% podílem oxidu železitého) se pro své antibakteriální účinky pro tyto účely používají dodnes. Díky vysoké tepelné kapacitě a stabilitě spolu s nízkým koeficientem teplotní roztažnosti našel ZnO své uplatnění při výrobě keramiky, která byla největším konzumentem produkce ZnO až do poloviny 19. století. Tehdy se začal oxid zinečnatý přidávat do kaučukových směsí za účelem zkrácení vulkanizačního času, aby po objevení se prvních organických katalyzátorů začal plnit funkci aktivátoru. Dále pak chrání pneumatiky před plísněmi a UV zářením. Dnes je v gumárenském průmyslu spotřebováno cca 60 % roční produkce, která v roce 2012 činila okolo 500 000 tun.

I když byl z hlediska moderní éry oxid zinečnatý předmětem vědeckého bádání od 20. let minulého století, systematický výzkum započal až s objevem polovodičového tranzistoru v Bellových laboratořích roku 1947. ZnO jako přímý polovodič s širokým zakázaným pásmem (3,37 eV při teplotě 300 K) má spoustu charakteristik, které jej činí atraktivním pro optoelektronické pokročilé aplikace. Oproti GaN, který se v podobných aplikacích používá, má vyšší vazebnou excitační energii (60 meV při teplotě 300 K). Dále je transparentní pro viditelné spektrum záření, odolný proti vysokým teplotám a radiačnímu záření. Proto je nasnadě jeho použití v LED (Light Emitting Device), UV laserových diodách, FET (Field Effect Transistors), a aplikacích spojených s kosmickým a nukleárním odvětvím. Díky absenci symetrie ve své krystalové mřížce má piezoelektrické vlastnosti, což rozšiřuje jeho aplikace na zpracování signálu a telekomunikace, např. SAW (surface acoustic wave resonators), MEMS a NEMS (micro- and nano-electromechanical systems) Nanogenerátory, zařízení schopné převáděním energie (mechanické), případně změny teplotních toků (pyroelektrické) na energii představují další významnou aplikaci, která je předmětem intenzivního výzkumu. Dále se podobně jako jiné polovodiče uplatňuje jako plynových, chemických a biologických senzorů. Kromě aplikací pramenící především z jeho optoelektronických a piezoelektrických vlastností nachází ZnO pro své antimikrobiální vlastnosti a biokompatibilitu uplatnění v biomedicínských aplikacích [1, 2].

## 2 KRYSTALOVÁ STRUKTURA A VLASTNOSTI ZNO

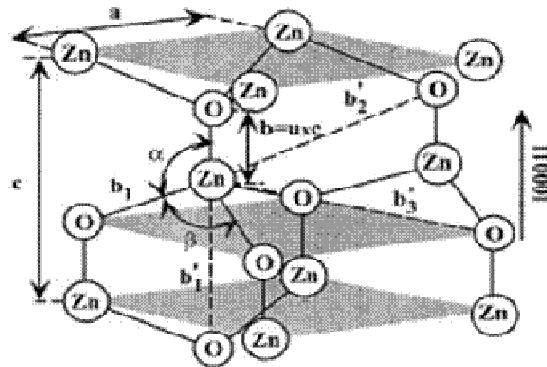
### 2.1 Struktura ZnO

Oxid zinečnatý se přirozeně vyskytuje v přírodě ve formě poměrně vzácného minerálu zincitu, který byl objeven roku 1810 Brucem v New Persey (USA). Krystalová struktura ZnO byla objasněna roku 1920, krátce po objevení X-ray difrakce. Za běžné teploty a tlaku krystalizuje oxid zinečnatý v tzv. Wurtzitově (B4) struktuře (Obrázek 3). Tu si lze představit jako hexagonální mřížku, pro kterou je typické vzájemné se prostupování sub-mřížek  $\text{Zn}^{2+}$  a  $\text{O}^{2-}$  tak, že každý kationt zinku je obklopen tetraedrem aniontů kyslík a naopak. Pro takovéto uspořádání atomů je typické kovalentní  $sp^3$  uspořádání vazby, avšak tyto materiály mají také značný iontový charakter (elektronegativita zinku je 1,65 a kyslíku 3,44). Tetraedrické uspořádání má za následek vznik polární symetrie podél osy  $c$ ; ta má zase zásadní vliv na některé vlastnosti, včetně piezoelektrických vlastností a spontánní polarizace, a také je klíčové pro kinetiku růstu jednotlivých rovin v ZnO krystalu. Bazální rovina je na jedné straně terminována buď atomy zinku  $\text{Zn}-(000\bar{1})$ , na druhé atomy kyslíku  $\text{O}-(000\bar{1})$ . Dalšími rovinami (Obrázek 1), které mají klíčový význam, co se týká růstu krystalu, jsou roviny  $(0001)$ ,  $(11\bar{2}0)$ ,  $(1\bar{1}00)$ , respektive směry  $\langle 000\bar{1} \rangle$ ,  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ ,  $\langle 1\bar{1}00 \rangle$  [3].



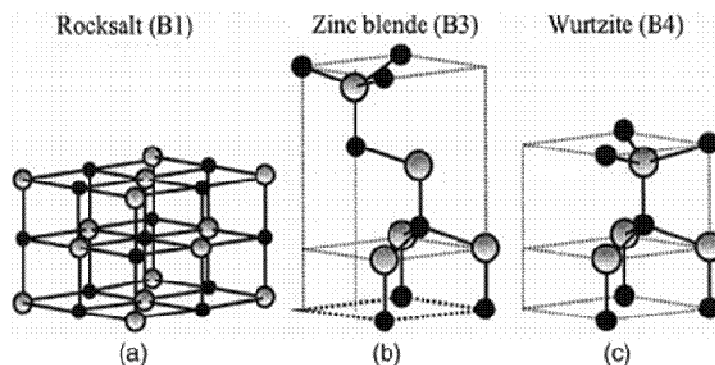
Obrázek 1 Směry, které jsou typické pro Wurtzite strukturu [4]

Hexagonální Wurtzite struktura je popsána parametrem  $u$  a mřížkovými konstantami  $a$ ,  $b$  a  $c$ . Hodnota  $a = 0,325$  nm,  $c = 0,521$  nm a jejich poměr  $c/a = 1,633$  (Obrázek 2). Parametr  $u$  je vyjádřením nejkratší vzdálenosti mezi dvěma sousedními atomy (vzdáleností  $b$  podělené mřížkovou konstantou  $c$ ) a jeho hodnota v ideálním krystalu je 0,375. Valenční úhly  $\alpha$  a  $\beta$  mají v ideálním krystalu velikost  $109,47^\circ$  [5].



Obrázek 2 Schematické zobrazení parametrů pro ZnO u struktury Wurtzite [4]

Kromě termodynamicky nejstabilnější Wurtzite fáze jsou známy další dvě krystalické fáze ZnO (Obrázek 3). Zinc blende strukturu můžeme stabilizovat pouze při růstu na substrátech s kubickou mřížkou a rocksalt ZnO strukturu lze získat pouze v relativně vysokých tlacích (až kolem 10GPa) [6].



Obrázek 3 kubická Rocksalt struktura, b) kubická Zinc blende struktura a c) hexagonální Wurtzite struktura. Šedou barvou jsou označeny atomy zinku a černou barvou jsou označeny atomy kyslíku [4]

## 2.2 Vlastnosti ZnO

### 2.2.1 Chemické vlastnosti

ZnO se vyskytuje ve formě bílého prášku. Molární hmotnost ZnO je 81,408 g/mol a hustota je 5,606 g/cm<sup>3</sup>. Minerální zinec může být díky nečistotám nebo příměsím manganu zbarvena do žluta až červena. Krystalický ZnO je termochromický, to znamená, že dokáže změnit svou barvu v důsledku změny teploty. Přečází z bílé na žlutou při zahřívání, při ochlazení se pak opět vrací do bílého zbarvení. Jedná se o amfoterní oxid, který je téměř nerozpustný ve vodě. Rozpouští se ve většině kyselin, jako je například kyselina chlorovodíková:



Při reakci se se zásadami tvoří komplexní sloučeniny:



Reakcí ZnO se sulfanem vznikají sulfidy:



Této reakce je komerčně využíváno k odstranění sulfanů, na stejném principu například fungují i deodoranty [7].

### 2.2.2 Elektrické vlastnosti

ZnO má poměrně široký pás zakázaných energií, 3,3 - 3,8 eV již při pokojové teplotě. Výhody, které širokým zakázaným pásmem získal, jsou vyšší průrazné napětí, schopnost vydržet silné elektrické pole, a nižší elektronický šum. Elektrické vlastnosti a vodivost můžeme ovlivnit přidáním příměsí - dopováním. Dopování se dále může rozdělit na dva základní typy:

- Donorové stavy – do mřížky je vnesen pětimocný příměsový atom, který uvolní je-den valenční elektron. Vzniknou tedy čtyři kovalentní vazby mezi nejbližšími sousedy a jeden valenční elektron navíc. Molekula zinku nese

tedy kladný náboj - donor. Převládne-li koncentrace donorů, bude se jednat o materiál typu n.

- Akceptorové stavy – do mřížky je vnesen trojmocný příměsový atom, který si získá elektron z valenčního pásu a tím vytvoří díru. K vytvoření díry je potřeba ionizační energie. Převládne-li koncentrace akceptorů, bude se jednat o materiál typu p.

V případě dopování nanodrátů se nejvíce využívá možnosti typu p. Protože prvky z V.A skupiny jsou sice považovány za mnohem stabilnější než prvky ze III.A skupiny, ale v praxi se ukázala jejich nízká reprodukovatelnost a poměrně malá vodivost. Mezi donorové materiály zařadíme prvky jako je dusík nebo fosfor, které mají menší iontový poloměr než zinek a prvky s větším iontovým poloměrem, arsen, bismut a antimon. Mezi trojmocné příměsové atomy, tj. atomy za III.A skupiny řadíme indium, galium, thalium hliník nebo bor [8].

### 2.2.3 Optické vlastnosti

ZnO, jak již bylo uvedeno, má zakázané pásmo 3,3 – 3,8 eV při pokojové teplotě, což odpovídá vlnové délce 380 nm v blízké UV oblasti. Optické vlastnosti ZnO jsou důležité pro celou řadu technologických aplikací. Příkladem můžou technologie jako je LASER, LED, DSSC a mnoho dalších různých senzorů. Ve fotoluminiscenční spektroskopii je možné získat jejich optickou charakterizací informace o zakázaném pásmu, defektech nebo kvalitě krystalové mřížky [9].

### 2.2.4 Tepelné a mechanické vlastnosti

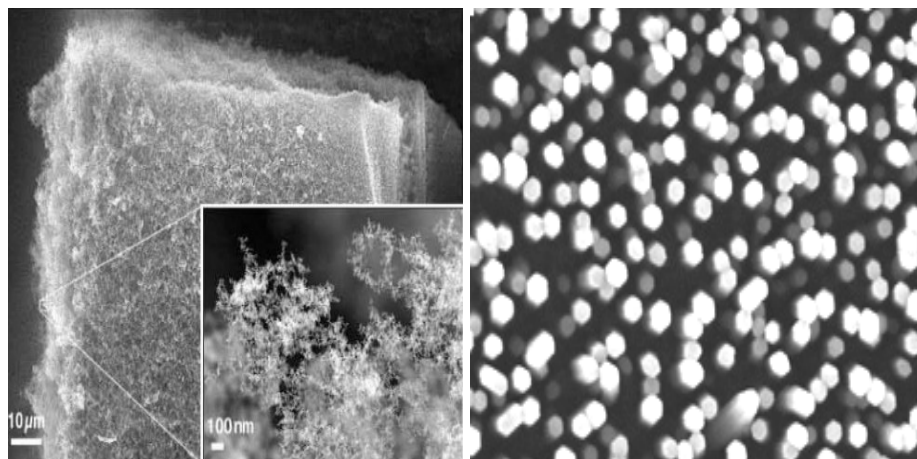
ZnO je relativně měkký materiál s přibližnou tvrdostí 4,5 podle Mohsovy stupnice. Mezi ostatními polovodiči vyniká vysokou tepelnou kapacitou, tepelnou vodivostí, nízkou tepelnou roztažností a vysokou teplotou tání. Dále má ZnO velký tenzor piezoelektrického napětí ve srovnání s GaN nebo AlN. Tepelná kapacita ZnO je uváděna okolo  $40 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ , při teplotách kolem  $630^\circ\text{C}$  zvýší až na hodnotu  $50 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ . Tepelná vodivost je při pokojové teplotě  $50 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ . Výhodou ZnO je nízký koeficient tepelné roztažnosti, při pokojové teplotě je jeho hodnota v rozmezí  $3 \cdot 10^{-6}$  až  $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [10].



### 3 NANOSTRUKTUROVANÉ MATERIÁLY

Většina vlastností pevných látek je určena na základě uspořádání „nekonečně“ velké 3-D sítě jejich základních stavebních jednotek, spíše než by pramenila z vlastností těchto jednotek samotných. V polovině minulého století však bylo dokázáno, že vlastnosti materiálů se výrazně mění, poklesne-li velikost jejich strukturních jednotek pod 100 nm. To bývá přičítáno, v závislosti na velikosti struktur, buď kvantovým efektům, nebo povrchovým jevům souvisejícím s růstem měrného povrchu, případně kombinaci obou. O nanomateriálech, nebo nanostrukturovaných materiálech pak hovoříme tehdy, mají-li alespoň jeden charakteristický rozměr mezi 1-100 nm, což v konečném důsledku ovlivňuje jejich fyzikálně-chemické vlastnosti v porovnání s materiály, které nanostrukturované nejsou. Nanostrukturované materiály lze dělit do tří skupin podle jejich dimenzionality:

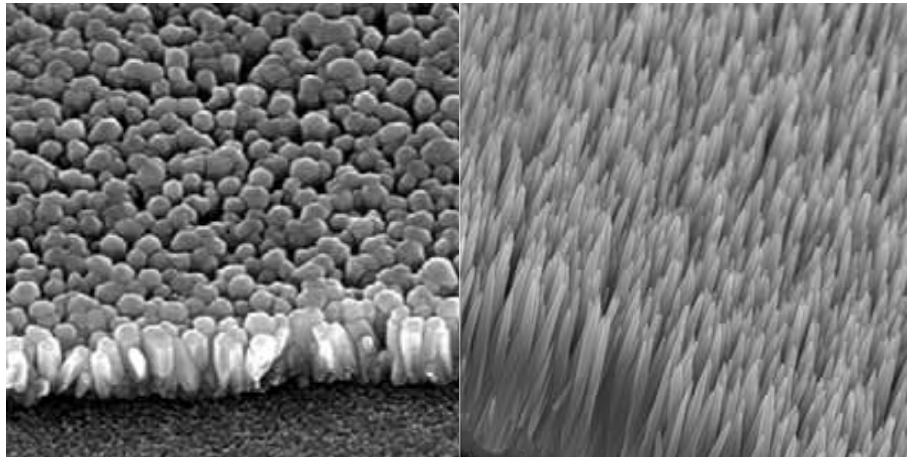
- **0-D nanostruktury**
  - Splňují rozměrové podmínky ve všech třech souřadných osách. Jedná se obecně o nanočástice, povlaky a vrstvy z nanokrystalů, nanopěny, porézní nanomateriály, kvantové tečky, nanostroje složené z makromolekul a objemové nanomateriály.



Obrázek 4 Vlevo příklad nanopěny, konkrétně se jedná o uhlíkovou nanopěnu [11] a vpravo příklady nanočástic SiO<sub>2</sub> [12]

- **1-D nanostruktury**

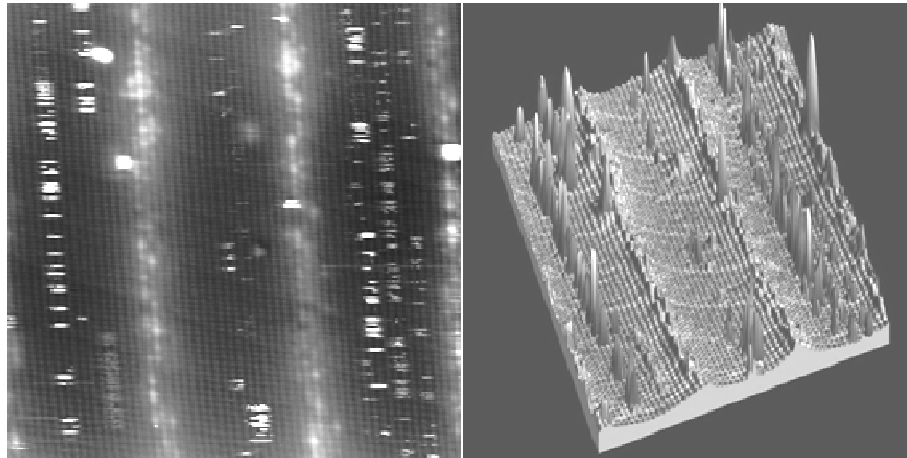
- Vykazují nanorozměry ve dvou souřadných osách. Mezi 1D nanoobjekty lze zařadit nanotyče, nanovláknna, nanokruhy, nanopásky, nanotrubičky, nanodráty, kvantové dráty a pilíře [13].



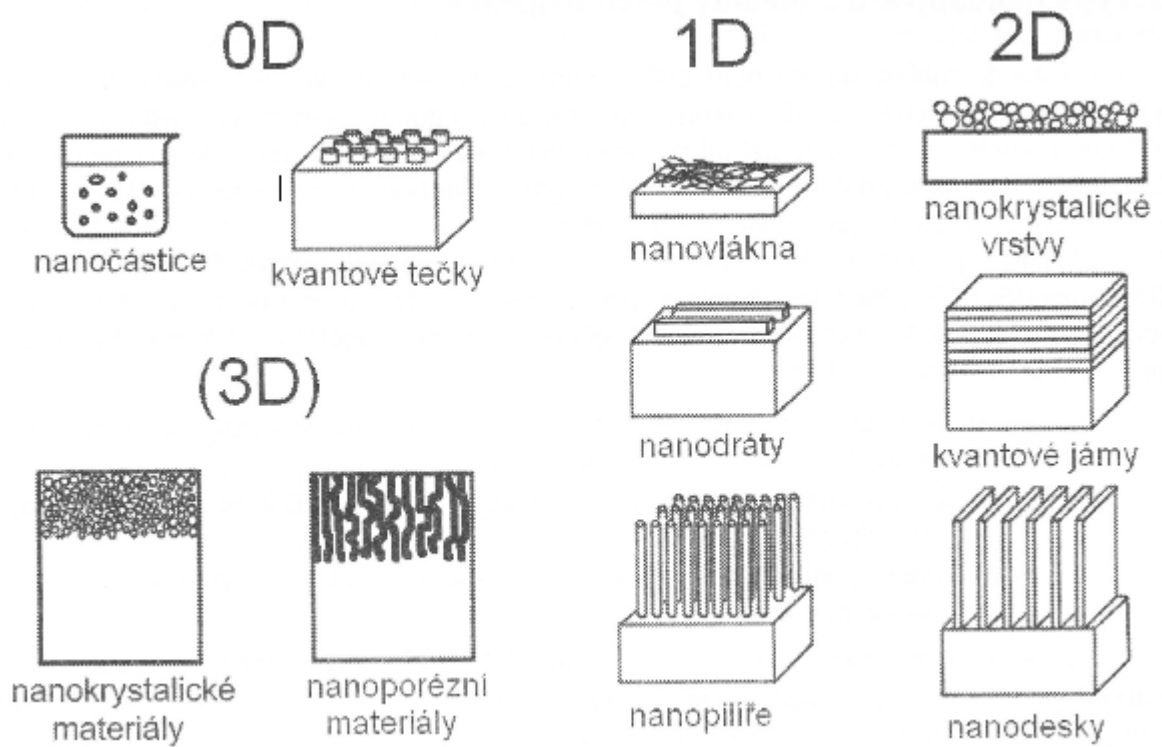
Obrázek 5 Příklady nanodrátů s různou velikostí [12]

- **2-D nanostruktury**

- Dosahují nanorozměrů pouze v jedné souřadné ose. Mezi 2D nanoobjekty se řadí například deskovité nanokrystaly, tenké vrstvy, nanostěny, rovinné makromolekuly nebo kvantové jámy zobrazené níže (Obrázek 6).
- Jejich molekuly jsou již složitě uspořádané, vychází z 0-D a 1-D nanostruktur [14, 15].



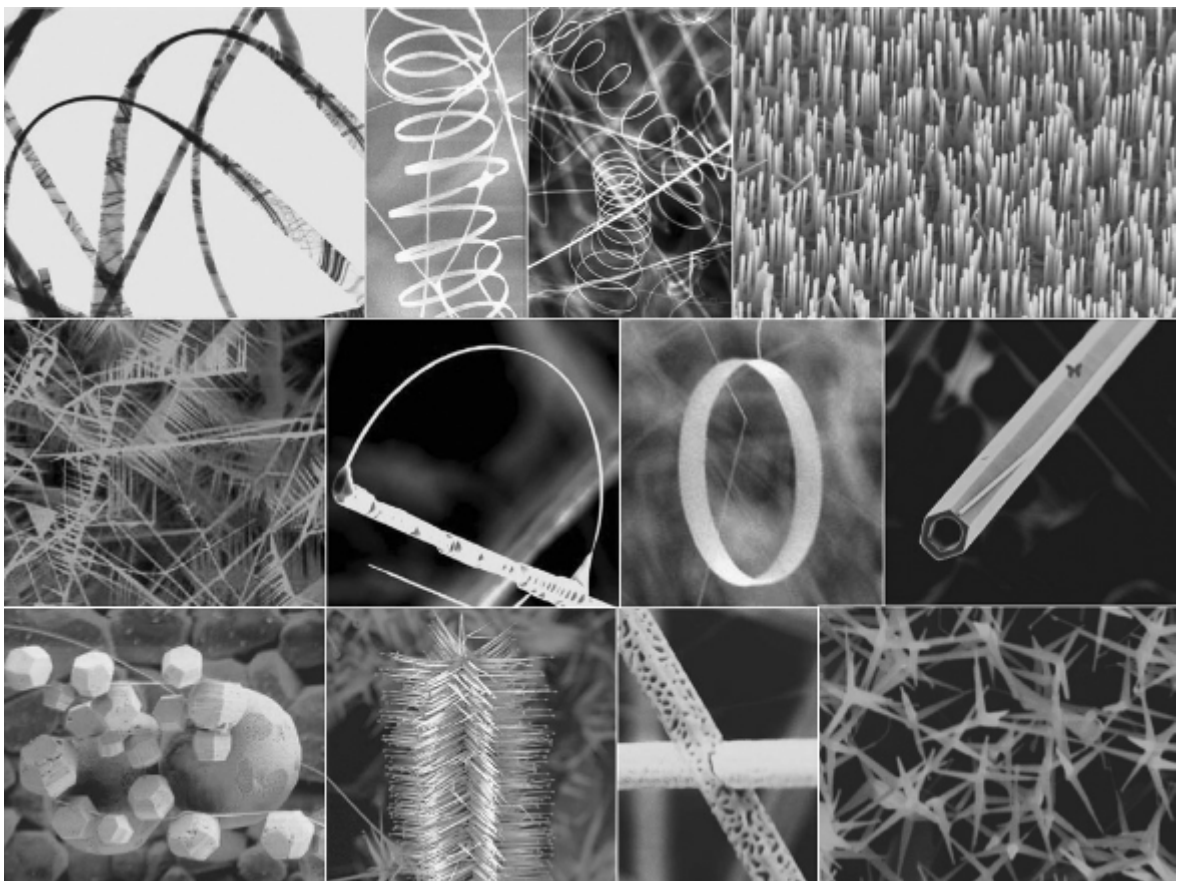
Obrázek 6 Příklad 2-D nanostruktury, konkrétně se jedná o InAsSb kvantové jámy, na levém snímku je pomocí rastrovacího tunelovacího mikroskopu zachyceno 2D, na pravém je 3D konstrukce [16]



Obrázek 7 Schematické nákresy x-dimenzionálních nanostruktur [17]

### 3.1 ZnO nanostruktury

Přípravě nanostrukturovaného ZnO na substrátech, zejména pak, nanodrátům, nanotyčinkám, a hierarchickým nanostrukturám byla z uvedených důvodů věnována značná pozornost, jako strukturám obzvláště příhodných pro uplatnění v optoelektronických, piezoelektrických a senzorických zařízeních. Za rovnovážných podmínek roste krystal ZnO preferenčně podél směru  $\langle 000\bar{1} \rangle$  což vede k tvorbě jehlic nebo tyčinek. Za nerovnovážných podmínek dochází ke změně energií jednotlivých rovin krystalu a rychlosti jejich růstu. Mezi nejčastěji připravované ZnO nanostruktury v laboratořích se řadí nanopásy, nanospirály a nanošroubovice, nanodráty, nanoluky, nanokruhy, nanotyče, nanotečky, nanohelixy, nanovlákná a nano-mnohostěnné klece, které jsou postupně vyobrazené níže (Obrázek 8) [18].



Obrázek 8 Příklady ZnO x-D nanostruktur na substrátech [12]

## 4 PŘÍPRAVA ZNO

### 4.1 Průmyslová výroba

Pro vysokou spotřebu ZnO v mnoha různých běžných průmyslových aplikacích, zejména pak gumárenském a plastikářském, se z ekonomického aspektu připravuje práškový ZnO velkotonážně dvěma základními způsoby, které se liší zejména čistotou, morfologií a velikostí částic.

#### 4.1.1 „Nepřímý“ francouzský proces

Francouzský proces výroby ZnO se vyvinul mezi lety 1840 až 1850, na popud použití v barvách a nátěrech. Proces se patentoval v roce 1850 ve Francii jeho vynálezci Leclairem a Barruelem. Metoda je založená na odpařování kovového zinku v grafitovém tavicím kelímku, oxidaci zinkových par, transportem do chladících trubíc za vzniku ZnO s průměrnou velikostí částic kolem 0,1 $\mu$ m.



Jedná se o nejvíce rozšířenou a nejrychlejší metodu na výrobu ZnO. Vzniklý produkt se však nehodí pro všechny aplikace. Jeho kvalita závisí na použití prekursoru. Čistota produktu je obvykle přes 99%. Produkt je nejvíce využíván gumárenským průmyslem.

#### 4.1.2 „Přímý“ americký proces

Je metoda, ve které jsou výchozími produkty sloučeniny zinku nebo zinková ruda. Zahříváním výchozích surovin se zdrojem uhlíku, jakým je například antracit a vzniknou opět páry zinku, které se oxidují a vznikne ZnO.



Čistota produktu nepřesahuje 99%, obvykle bývá kolem 98,5%. Produkt je nejvíce využíván v keramickém a barvířském průmyslu [2].

## 4.2 Příprava ZnO na substrátech

V aplikační oblasti optoelektroniky, senzoriky, solárních celách apod., se pěstují ZnO struktury s výhodou přímo na vodivých substrátech (viz Obrázek 7). Musí se tudíž připravovat jinou cestou, která povede k cílené tvorbě dané struktury a vlastností ZnO. Anizotropie krystalové struktury ZnO napomáhá růstu nanotyček a nanodrátů.

### 4.2.1 Suchý proces - „Vapor Phase Synthesis“

Produkty reakce jsou získány z plynných prekurzorů nebo meziproductů. Produkty mohou být tvořeny v reakci, probíhající v plynné fázi nebo tepelnou reakcí plynných prekurzorů po adsorpci na substrát v procesu CVD. Jedná se ovšem o velmi náročné procesy z hlediska energetického i experimentálního, probíhajících v rozmezí teplot 500-1400 °C a za vysokých či naopak nízkých tlaků.

### CVD – „Chemical Vapor Deposition“

Jedna z nejdůležitějších metod k přípravě tenkých filmů nebo na coating anorganických materiálů různého složení. CVD je proces, kde jeden či více těkavých prekurzorů jsou transportovány do reakční komory, ve které se rozloží na vyhřátý substrát. Tím se na substrát uloží tenký pevný film. Materiály takto uložené se skládají z kovu a rozdílných více-prvkových materiálů, jako jsou oxidy, sulfidy, amidy, karbidy, boridy, křemičitany a další. Podle varianty prekursoru nebo použití techniky postupu se dělí CVD na mnoho podružných metod, jako jsou MOCVD nebo MOVPE, kde prekurzor je organokovová sloučenina. Další metody jsou plazmou indukované PECVD nebo PACVD, laserem indukované

LCVD. Mezi nejdůležitější však patří ALD – „Atomic Layer Deposition“, CBE – „Chemical Beam Epitaxy“ a MOMBE – „Metal Organic Molecular-Beam Epitaxy“.

- CBE – „Chemical Beam Epitaxy“

Technika používaná hlavně při výrobě semikonduktorů. Jedná se o depoziční techniku, v systému s vakuem. Reaktanty jsou ve formě molekulových svazků a většinou se jedná o organokovy.

- ALD – „Atomic Layer Deposition“

Metoda používaná na kontrolované ukládání monovrstev. Při ALD reakcích se vychází ze dvou chemikálií, které reagují postupně s povrchem. Mnohonásobným ukládáním takových střídajících se vrstev se vytvoří tenký film.

**PVD – „Physical Vapor Deposition“**

Hlavní metoda pro metalizaci mikroelektroniky, která probíhá ve třech krocích. Zaprvé vypařování pevné fáze, zadruhé transport plynných složek od zdroje k substrátu a nakonec kondenzace plynných složek na povrchu substrátu následovanou nukleací a růstem nové vrstvy. Hlavní rozdíl mezi CVD a PVD je v tom, že CVD filmy jsou vytvářeny prekursory při reakci na substrátu, kdežto v PVD je pevný prekurzor odpařen a uložen jako takový na podklad. Jednou z hlavních výhod PVD je nízká náročnost na teplotní zpracování, což umožňuje použití polymerních substrátů.

- PVD pomocí termálního odpařování

Metoda, která je široce využívána pro ukládání kovových filmů na substrát ve větším měřítku. Princip spočívá v soustředění paprsku elektronů nebo laserového paprsku na cílový materiál, aby se vypařil. Vypařený materiál se následně usazuje při daných teplotách na substráty. Existují dva různé postupy, při nízkém a vysokém tlaku. Při nižších tlacích je potřeba nižších teplot.

- PVD pomocí termálního odpařování

Metoda, která je široce využívána pro ukládání kovových filmů na substrát ve větším měřítku. Princip spočívá v soustředění paprsku elektronů nebo laserového paprsku na cílový materiál, aby se vypařil. Vypařený materiál se následně usazuje při daných teplotách na substráty. Existují dva různé postupy, při nízkém a vysokém tlaku. Při nižších tlacích je potřeba nižších teplot.

- PVD pomocí rozprašování

Metoda, při které jsou povrchové atomy výchozího materiálu bombardovány a uvolňovány pomocí iontů, vyvolaných doutnavým výbojem nebo pomocí laseru. Uvolněné atomy se přemisťují na substrát, kde kondenzují. Jedná se o metodu, která je hodně využívána při konstrukcích integrovaných obvodů.

Poměrně jednoduchý proces, ve kterém jsou elementární zdroje nezávisle na sobě odpařovány, molekulární svazky jsou v jisté míře formovány a jsou zachycovány na zahřátý substrát. Vzniklé tenké filmy vykazují velkou čistotu a velmi komplexní strukturní vrstvy [19].

#### **4.2.2 Mokrý proces – „solution phase synthesis“**

Mokrý procesy jsou definovány jako homogenní nebo heterogenní reakce v přítomnosti roztoku pomocí nebo bez mineralizéru, při teplotách vyšších než pokojová teplota a tlaku vyšším než 1 bar v uzavřeném systému. Oproti suchým procesům probíhají za výrazně nižších teplot a běžných tlaků, nejsou tak náročné na experimentální zařízení a umožňují relativně jednoduché škálování. Uvedené výhody činí tyto metody zajímavými zejména z hlediska možnosti přípravy ZnO struktur na polymerních substrátech, což není kvůli extrémním podmínkám možné docílit suchými procesy.

#### **- Hydrotermální syntéza**

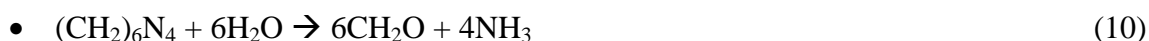
Vychází se z obecné definice pro mokrý proces, kde jako rozpouštědlo používá vodný roztok. Hydrotermální metody si získávají velkou pozornost v oblasti výzkumu a jsou již široce využívány k přípravě 1D nanostruktur. Základní postup pro růst kolmo orientovaných nanodrátů a nanotyček je popsán v následujících krocích:



1. Nanesena tenká vrstva ZnO nanočástic na určitý substrát, který si pro syntézu zvolíme. Nanesená vrstva podporuje nukleaci pro růst nanodrátů.
2. Vodný prekursor (roztok pro růst nanodrátů) obsahuje směs roztoků zásady OH<sup>-</sup> (NaOH, KOH, HMTA atd.) a kyselých solí Zn<sup>2+</sup> (např. Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, ZnCl<sub>2</sub> apod.). Jedná se tedy o precipitaci.
3. Substráty potažené zárodečnou vrstvou ZnO jsou umístěny do roztoku a růst probíhá v závislosti na daných podmínkách [20, 21].

## 5 HYDROTERMÁLNÍ SYNTÉZA ZNO NANODRÁTŮ

Hydrotermální syntéze ZnO nanodrátů je věnována značná pozornost, protože umožňuje pěstovat tyto struktury na substrátech, které nemohou být jinak použity při vysokoteplotních, „suchých“ procesech, hlavně pak polymerních substrátech. Níže jsou v bodech shrnuty faktory, které mají na samotnou syntézu vliv. V případě použití HTMA a  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$  jako nejčastěji používaných prekurzorů, lze proces růstu shrnout do následujících rovnic [21]:



### 5.1 Substrát

Vertikálně orientované ZnO nanodráty narostou na rovném povrchu, bez ohledu na podklad (polymer, sklo, polovodič, kov a další) a stačí jen kontrolovat stanovené podmínky růstu. Je možné ZnO nanovlákná pěstovat také na organických substrátech. Již byly úspěšně vy-pěstované na polydimethylsiloxanu, polystyrenu, polyethyltereftalátu, polyethylenových vláknech, mikrovláknech, polyuretanu, polyamidu, celulóze nebo na jiném organickém substrátu, jako je například lotosový list [22].

### 5.2 Zárodečná vrstva

Typickým procesem pro tvorbu zárodečných vrstev je spin coating ZnO nanočástic. Pro zlepšení přilnavosti zárodečné vrstvy na substrát se většinou provádí žíhání při teplotách, které snese daný substrát. Uspořádání, tloušťka a velikost zárodečné vrstvy také silně ovlivňuje růst ZnO nanodrátů. Pokud se zvýší tloušťka zárodečné vrstvy, tak podle poznatků se zvětšuje průměr, zmenšuje délka a snižuje celková hustota nanotyček. Bez zárodečné vrstvy mohou být nanodráty pěstovány na substrátu s naprášeným zlatem, do roztoku prekurzoru se však musí přidat v určitém poměru roztok NaOH. Zlato se používá jako mezivrstva k růstu ZnO nanodrátů a nanotyček [23, 24].

### 5.3 Prekurzor $Zn^{2+}$

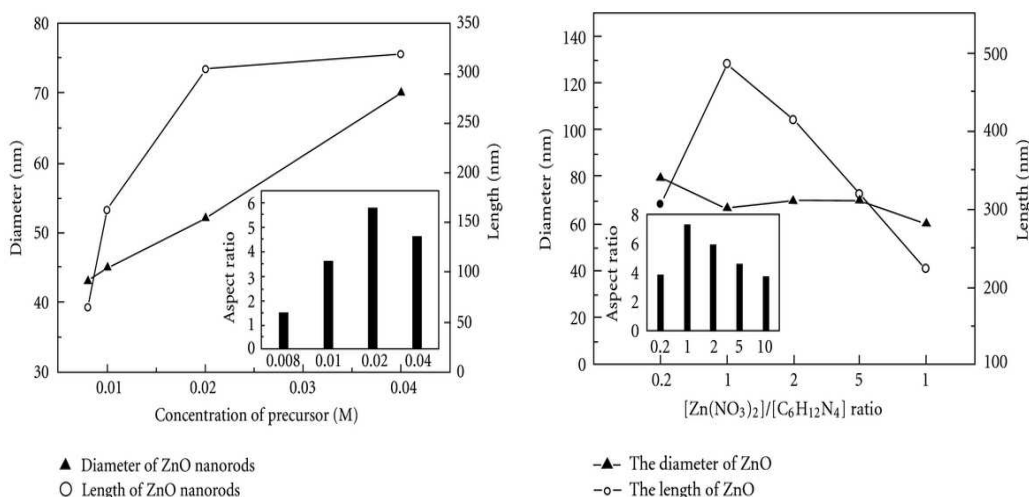
Pro správný průběh reakce je nezbytné dodávat  $Zn^{2+}$  ionty. Zdrojem takových iontů jsou soli zinku. Příkladem jsou  $Zn(NO_3)_2$ ,  $ZnCl_2$ ,  $ZnS$ ,  $Zn(CH_3COO)_2$ . Většinou se jedná o jejich vodné roztoky. Po vyčerpání roztoku přestává běžet reakce. Zájmem dnešních studií, je možnost opětovné přípravy výchozích roztoků pro syntézu, tím by se prodloužila doba růstu nanodrátů a úměrně tomu by byla rovna potom jejich délka.

### 5.4 Prekurzor $OH^-$

Existuje hned několik možností, jak dodávat do reakce  $OH^-$  skupiny. Mezi základní patří roztoky hydroxidu sodného, hydroxidu draselného, amoniaku, hexamethylentetraminu (HMTA), uhličitanu sodného nebo ethylendiaminu. Pokud pro reakci zvolíme KOH, NaOH nebo  $Na_2CO_3$ , tak se provádí při teplotách vyšších než  $100^\circ C$  a naopak když zvolíme HMTA,  $NH_2(CH_2)_2NH_2$  nebo  $NH_3$ , tak se teploty pohybují pod  $100^\circ C$ . Nicméně nejčastěji se používá HMTA, protože jeho produkty bývají nejvíce kvalitní. HMTA hraje důležitou roli v několika procesech během reakce. Zaprvé dodává  $OH^-$  ionty potřebné pro reakci a zadruhé funguje jako pufr, tím že zmíněné ionty uvolňuje pomalu a postupně prostřednictvím tepelného rozkladu. Rychlost hydrolyzy HMTA se zvyšuje se snižováním pH a naopak. Za třetí, HMTA obsazuje nepolární roviny na ZnO nanodráttech a zabraňuje jejich růstu do šířky, tím podporuje jejich růst do délky ve směru (0001) [21, 25].

### 5.5 Koncentrace prekurzoru

Při experimentálních výzkumech bylo zjištěno, že výsledné nanodráty ovlivňuje jak koncentrace prekurzorů  $Zn^{2+}$  a  $OH^-$ , tak jejich poměr v roztoku. Zvýšení koncentrace nám do jisté míry umožňuje zvýšit průměrnou délku a poloměr nanodrátů. Neplatí zde však přímá úměra. Při vyšších koncentracích se začne roztok přesycovat a srážet v objemu, což je negativním jevem při pěstování nanostruktur. Závislost růstu nanodrátů a nanotyček do délky a šířky v závislosti na koncentraci je zachycena na níže (Obrázek 9).



Obrázek 9 Závislost průměru a délky nanodrátů zleva na koncentraci prekurzorů [26] a na poměru těchto prekurzorů [27]

Dále se uvádí, že hustota nanodrátů je velmi citlivě závislá na koncentraci. Při příliš nízké koncentraci roztoků, je velmi malá hustota jednoduchých ZnO krystalů, kdežto při příliš vysoké koncentraci se shlukují ZnO nanodráty v jeden ucelený polykrystal [28].

## 5.6 pH roztoku

Vliv má hlavně na morfologii a velikost nanodrátů. Bylo zjištěno, že při zvyšování pH k jeho možné horní hranici pro naše použití se zvětšoval průměr nanodrátů. Při vyšším pH dochází také k rychlejšímu růstu, ten má však za následek snižování velikosti energie zakázaného pásma [29].

## 5.7 Teplota

Na základě provedených pokusů bylo zjištěno, že teplota nemá žádný významný vliv na tvorbu nanodrátů nebo na jejich velikost a morfologii. Pozorovali změny růstu v teplotním rozmezí 65°C až 95°C. Ve všech případech, jim za stejný časový úsek vznikly stejné struktury.

## 5.8 Čas

V provedených studiích bylo prokázáno, že průměr nanodrátů je úzce spojen s časem. Konečnou dobou růstu do šířky byly 2 hodiny a 30 minut. Na obrázku je uveden průběh experimentu a šířky v časových intervalech.

Čas růstu (hod.)	průměrná šířka (nm)
0,5	35
1	37
1,5	55
2	90
2,5	100
3	100

Obrázek 10 Závislost růstu na čase [30]

Nadále však pokračoval jejich růst do délky, i když byl růst do šířky ukončen. Díky tomuto poznatku se dnes uvažuje o možnosti připravování prekurzorů během reakce a jejich přidávání. Dodávání materiálu k růstu ZnO struktur do délky se mohou teoreticky vytvořit nekonečně dlouhé tyčinky [30].

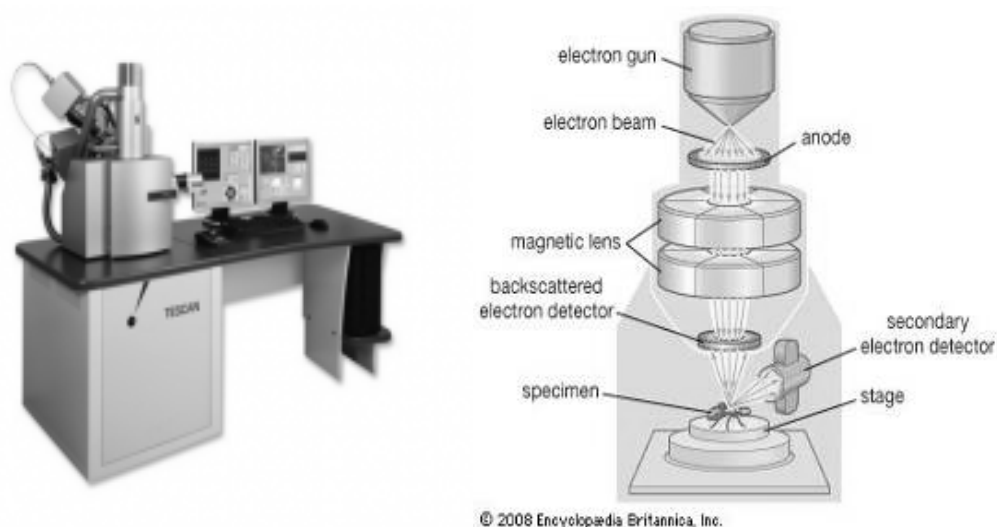
## 5.9 Aditiva

Selektivně blokují růst v jednom směru. Přídavkem polyethyleniminu (PAI) se vyblokuje růst do šířky, vážou se na boční roviny a podporují tím růst do délky. Stejnou roli má v roztoku  $\text{NH}_3$  a také pravděpodobně HMTA. Výzkumy ukázali, že s přídavkem  $\text{NH}_3$  je průměr nanodrátů redukován ještě mnohem více než pomocí PAI [31].

## 6 CHARAKTERIZAČNÍ METODY

### 6.1 Mikroskopická charakterizace

K ověření nově vytvořených struktur ZnO na povrchu substrátu byl použit snímací elektronový mikroskop (SEM), typu VEGA 2 LM, jak je zobrazeno níže (Obrázek 11).



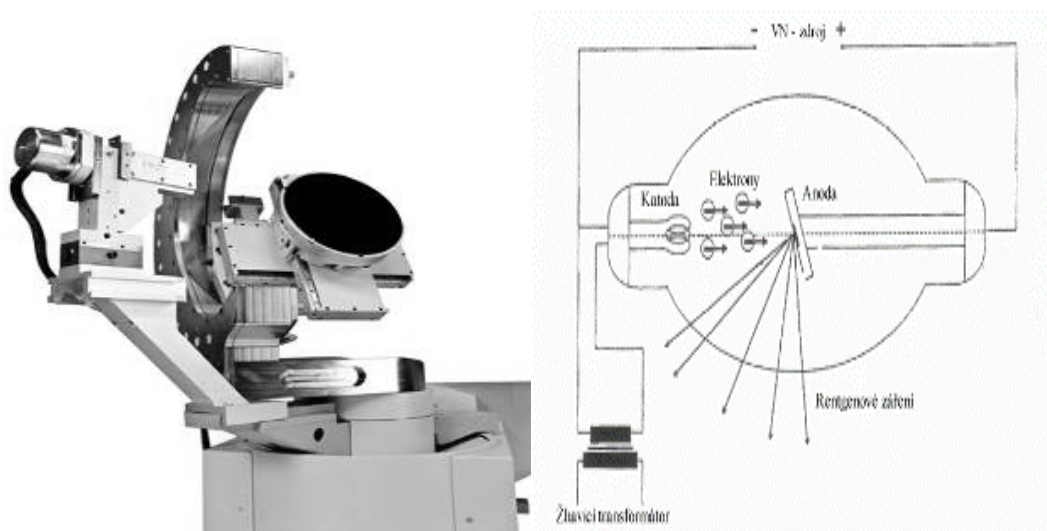
Obrázek 11 Nalevo je zobrazen snímací elektronový mikroskop VEGA 2 LM a napravo je uveden princip jeho funkce [32]

Princip metody je do značné míry analogický k principu běžného optického mikroskopu s tím rozdílem, že místo fotonů se na vzorek fokusuje nikoli paprsek fotonů, ale elektronů; a ty nejsou na své cestě tubusem usměřňovány čočkami skleněnými, ale magnetickými či elektromagnetickými. Zdrojem elektronů může být žhavené wolframové vlákno, nebo jiné materiály, elektrony jsou vytrhovány z hrotu katody na základě termoemise. Odlišný je princip u tzv. FE SEM (Field Emission SEM), kde jsou elektrony emitovány za studena díky tunelovému jevu. Vytržené elektrony jsou urychlovány rozdílem potenciálů (0.5 – 30 kV) a fokusovány. Po dopadu na vzorek se v důsledku nepružných a pružných srážek generuje pestrá paleta signálů, které lze detekovat; nejběžněji se detekují sekundární elektrony (SE) a elektrony zpětně odražené (BSE) [33].

## 6.2 Rentgenová charakterizace

K ověření fázové struktury připravených materiálů bylo použito metody rentgenové difrakce. Charakterizace byla provedena na multifunkčním difraktometru PANalytical X'Pert PRO MPD,  $\text{Cu}_{K\alpha}$  ( $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$ ) v rozsahu úhlů  $2\theta = 5\text{-}85^\circ$ .

V analytické chemii se využívá rentgenového záření, protože jeho energie závisí na materiálu anody, nikoliv na napětí anody. Potom jsou rentgenová záření charakteristická pro konkrétní prvky. Se zvyšujícím protonovým číslem, se zvyšuje i energie rentgenového záření. Princip je založen na rychle letících elektronech, které odevzdávají svou kinetickou energii elektronu ve vnitřním orbitalu atomu anody, tím dojde k excitaci nebo ionizaci toho elektronu. Návratem do základního energetického stavu se vyzáří foton s charakteristickým rentgenovým zářením (Obrázek 12) [34].



Obrázek 12 Rentgenové zařízení a schéma principu rentgenového měření

[35]

Difrakci na krystalu lze popsat jako odraz na soustavě mřížkových rovin s následnou interferencí. Pro dráhový rozdíl paprsků na sousedních rovinách musí být splněna Braggova podmínka, pro kterou platí rovnice:

$$2 * d * \sin \theta = n * \lambda, \quad (14)$$

kde  $d$  je dráhový rozdíl,  $n$  je difrakce  $x$ -tého řádu,  $\theta$  je difrakční úhel a  $\lambda$  je vlnová délka. Jedná se o vztah vyjadřující difrakci paprsků na roviny krystalu, které jsou od sebe vzdáleny o délku  $d$ . Paprsek dosáhne maxima jen tehdy, když se dráhový rozdíl bude rovnat celé délce vlny, nebo jejímu celému násobku [8].



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Použité zařízení

Spin-coater Laurell model WS-400BZ, filtrační systém Sartorius, filtrační papír Pragopor s velikostí pórů 0,23  $\mu\text{m}$ , magnetické míchadlo, laboratorní vařič Heidolph, ultrazvuková vodní lázeň Powersonic PS 12000A, sušárna Memmert, analytické váhy.

### 7.2 Použité laboratorní sklo a ostatní vybavení

250ml kádinky, 500ml kádinky, tyčinky, 150ml odměrný válec, Petriho misky, stojan, alobalová fólie, teploměr, mikropipeta.

### 7.3 Chemikálie

- **Dusičnan zinečnatý hexahydrát –  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**

Výrobce: Výrobní divize Chrudim, Ing. Petr Švec

Relativní hustota ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 2,06

Molární hmotnost ( $\text{g}/\text{mol}$ ): 297,49

Obsah  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (%): 99,0

CAS: 10196-18-6

- **Hexamethylenetetramin (HMTA) –  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$**

Výrobce: Lach – Ner, s.r.o., Neratovice

Relativní hustota ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 1,33

Molární hmotnost ( $\text{g}/\text{mol}$ ): 140,19

Obsah HMTA (%): 99,6

CAS: 100-97-0

- **Ethanol –  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$**

Relativní hustota ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): 0,789

Molární hmotnost ( $\text{g}/\text{mol}$ ): 46,07

- **Methanol – CH<sub>3</sub>OH**

Relativní hustota (g/cm<sup>3</sup>): 0,791

Molární hmotnost (g/mol): 32,04

- **Demineralizovaná voda**
- **Suspenze pro tvorbu zárodečných částic**

Přibližně 40% roztok nanočástic ZnO.

## 7.4 Substrát

### 7.4.1 PET – polyethyltereftalát

Polymer ze skupiny termoplastických polyesterů. Surovina pro výrobu vláken nebo fólií. Folie z PET mají velmi dobrou mechanickou pevnost, malou propustnost pro vlhkost nebo plyny, jsou opticky čiré a dosahují dobrých elektroizolačních vlastností. Pro naše použití jsou výjimečné v tom, že si popsané vlastnosti zachovávají i v poměrně rozsáhlém teplotním rozdílu, a to od -70°C do +130°C [36].

### 7.4.2 ITO – indium tin oxide

Kombinace In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dopovaného SnO<sub>2</sub> v hmotnostním poměru 9:1. Na substrát se aplikuje jako tenká vrstva, která je zcela transparentní, bezbarvá, v tlustších vrstvách má tendenci žloutnout. Absorbuje v UV části spektra, to znamená, že po srážce elektronu s fotonem z UV záření se elektron uvolní z valenčního do vodivostního pásu. Při výzkumech tenkých vrstev ITO se snaží nalézt ideální poměr mezi transparentností a vodivostí. Při snížení tloušťky vrstvy se zvýší transparentnost, avšak se sníží vodivost. Oxid india je bez příměsí cínu polovodičem, teprve až po jeho dodání nabývá elektrických vlastností. Vnikají vazby Sn-O a Sn-O<sub>2</sub>, kde Sn-O<sub>2</sub> vystupuje jako dárce elektronu a Sn-O jako akceptor elektronu. Většinou je dominantní zastoupení Sn-O<sub>2</sub> a atomy cínu působí jako dárce elektronu. V oblasti vývoje transparentní elektroniky se nejvíce využívá PET folie s deponovanou vrstvou ITO. Jejich kombinací získáme flexibilní, transparentní, vodivý ale i pevný materiál [37].

## 7.5 Příprava zárodečné vrstvy

Pro přípravu zárodečné vrstvy na substrát jsme pro spin-couting připravili 40% roztok ZnO. Pro rozpuštění 400 mg ZnO se použila kombinace 200  $\mu\text{l}$  methanolu a 800  $\mu\text{l}$  100% ethanolu. Suspenze se dokonale promíchala a následně pak ještě protřepala v ultrazvukové lázni. Pomocí mikropipety se nanasla kapička suspenze přes otvor na substrát upevněný ve spin-coateru, a tak se vytvořila při 1000 ot./min první zárodečná vrstva. Stejně množství suspenze se nanášelo i na druhou a třetí vrstvu, pouze se zvýšila rychlost rotace na 1500 ot./min. Vytvořila se tak řada substrátů, pro možnost výběru nejvhodnějšího kandidáta pro syntézu. Substráty se ještě dosušil v sušárně při maximální teplotě, kterou mohl daný substrát vydržet.

## 7.6 Příprava prekurzorů

- **Příprava roztoku hexahydrátu dusičnanu zinečnatého**

K syntéze bylo potřeba připravit 150 ml 0,025M roztoku  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Výpočet navážky podle vzorce:

$$c = \frac{n}{V} = \frac{m}{M * V}, \quad (15)$$

kde  $n$  je látkové množství použité chemikálie,  $c$  je koncentrace výsledného roztoku,  $V$  je objem výsledného roztoku a  $M$  je molární hmotnost použité chemikálie.

$$m = c * V * M = 297,49 * 0,150 * 0,025 = 1,116\text{g} \quad (16)$$

Na analytických vahách se navážilo vypočtené množství výchozí látky s přesností na tisícinny gramu do předem připravené, ošetřené 250ml kádinky. Přesně zaznamenaná navážka výchozí suroviny pro vlastní pokus činila 1,117 g. K navážce se přidala destilovaná voda pomocí odměrného válce v množství 150ml. Následovalo důkladné promíchání roztoku skleněnou tyčinkou s konečným roztřepáním v ultrazvukové vodní lázni. Práce s roztokem musela probíhat rychle, jelikož hexahydrát dusičnanu zinečnatého ve vodním roztoku měl tendenci se srážet v objemu.

- **Příprava roztoku HMTA**

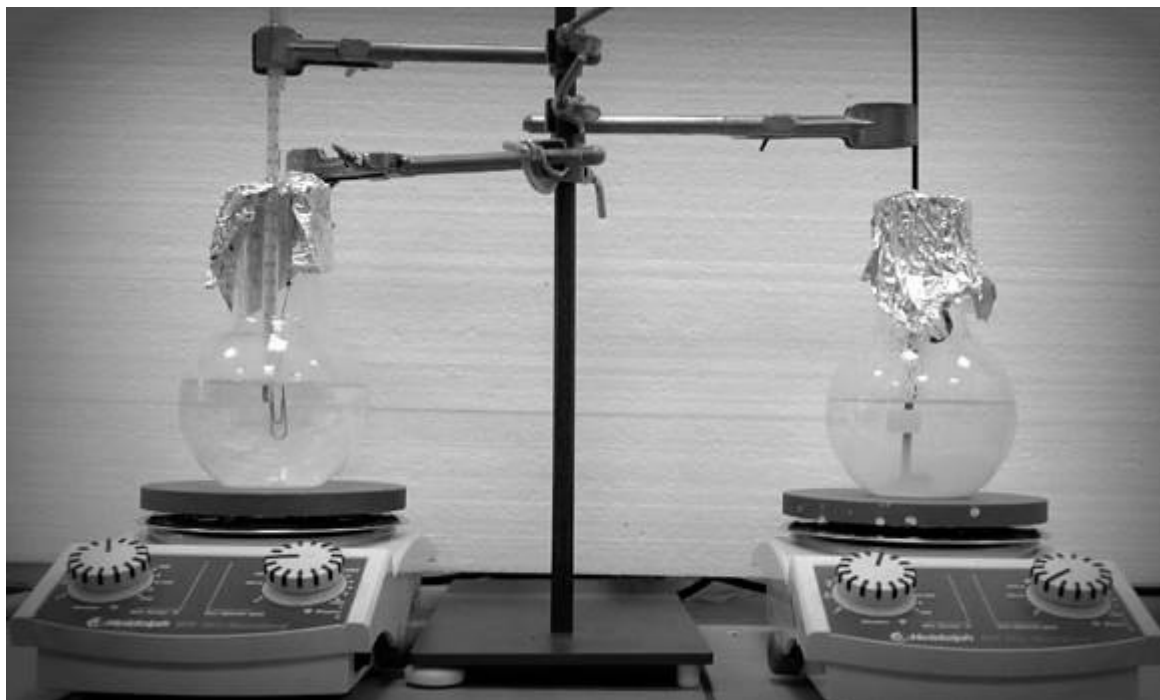
K syntéze bylo potřeba připravit 150 ml 0,025M roztoku HMTA. Navážka HMTA se počítala podle stejného vzorce jako navážka hexahydrátu dusičnanu zinečnatého.

$$m = c * V * M = 140,19 * 0,150 * 0,025 = 0,525 \text{ g} \quad (17)$$

Pomocí analytických vah se navážilo vypočítané množství výchozí látky, opět s přesností na tisícinu gramu, do předem připravené a ošetřené 250ml kádinky. Přesná navážka HMTA byla 0,527 g. Následně bylo přidáno 150 ml destilované vody pomocí odměrného válce, roztok se promíchal skleněnou tyčinkou a roztřepal v ultrazvukové vodní lázni.

## 7.7 Hydrotermální syntéza

Prvním krokem bylo smíchání připravených roztoků HMTA a hexahydrátu dusičnanu zinečnatého do 500ml varné baňky. Nechal se postupně zahřát vaříč až na teplotu 100°C. Roztok se povařil po dobu 20 minut, při snížené teplotě (70°C), tak aby se ve velké míře nevysrážel v objemu. Současně se připravila aparatura Sartorius k filtraci a čistá 500ml varná baňka, do níž se přefiltrovaný roztok vлил. Pomocí vlastnoručně sestrojeného upevňovacího systému (Obrázek 14), kompatibilním s varnou baňkou se upevnil substrát se zárodečnou vrstvou k hrdlu a držákem ke stojanu (soustava tvořená z drátu a kancelářské spony). Dopřipravil se zbytek aparatury, včetně teploměru pro kontrolu procesu (Obrázek 13) a byla zahájena hydrotermální syntéza ZnO nanodrátků. Proces probíhal po dobu 2 hodin a 30 minut při teplotě 80°C, která se musela striktně dodržovat (laboratorní podmínky nám umožnili dodržet 80°C±2°C). Po uplynutí časového intervalu se opatrně vyňala varná baňka se vzorky, pro které byli již připravené Petriho misky s popiskem. Vzorky se nesměly přilepit ke sklu, tudíž byly podloženy. Takto nachystané vzorky se přenesly do vyhřáté sušárny (přibližně 65°C). Po hodině sušení se vzorky umístily do uzavřených krabiček a nachystali se k mikroskopické a rentgenové charakterizaci.



Obrázek 13 Aparatura připravená k hydrotermální syntéze ZnO nanodrátů



Obrázek 14 Detailní záběr na úchyt vzorku

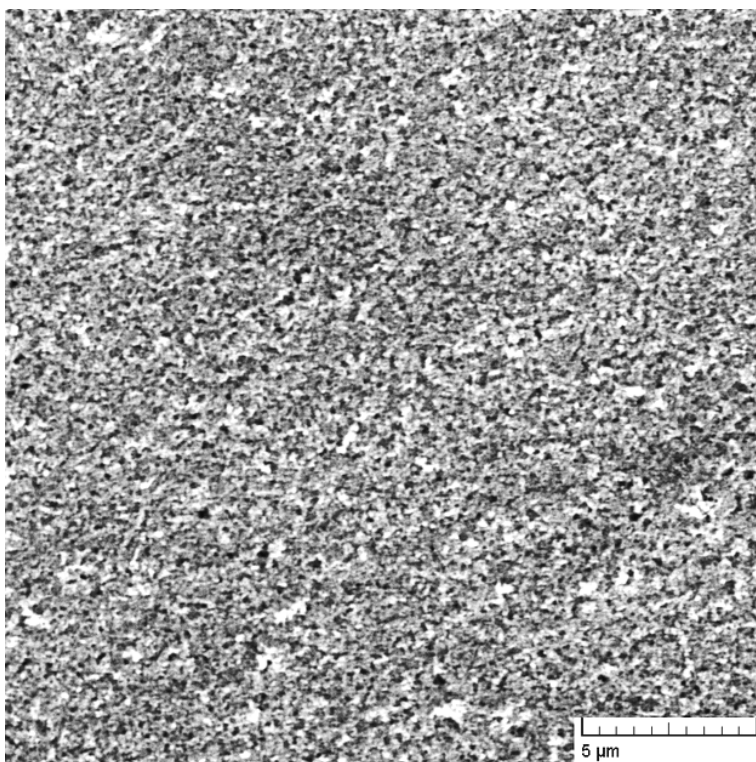
## 7.8 Charakterizace vzorku

Vzorky uchované v krabičkách s popisem se opláchly a usušili, a podrobili se rentgenové charakterizaci. Pro mikroskopickou charakterizaci se použil jen malý ústřížek vzorku.

## 7.9 SEM snímky vzorků

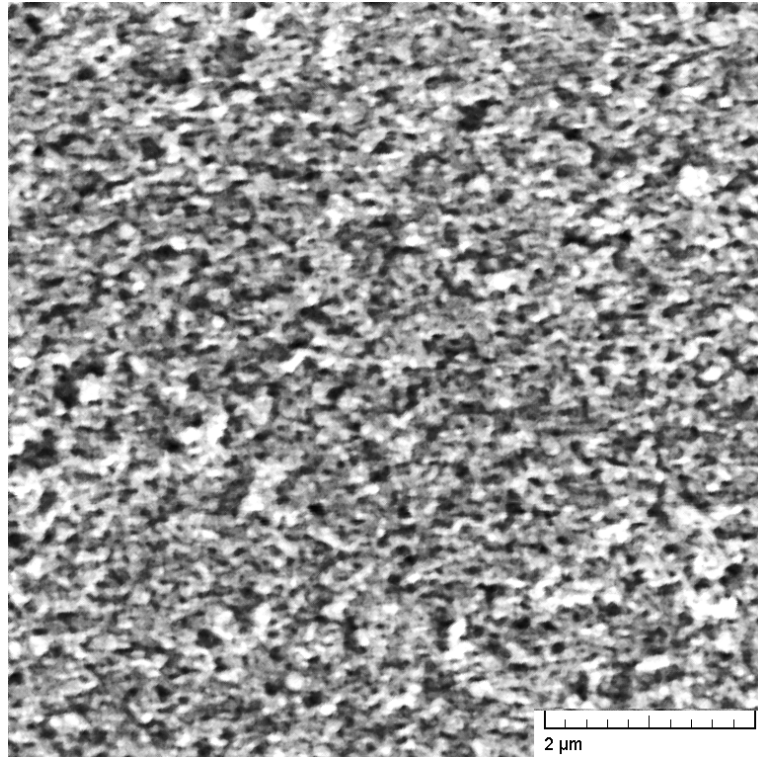
Pořadí vložených snímků kopíruje postu práce. Pro další operace byly vyselektovány 3 vzorky. Vzorek č. 1 – substrát (PET s vrstvou ITO), vzorek č. 2 – substrát s vrstvou nanodrátů, u kterého nebyla provedena filtrace popsaná v postupu a vzorek č. 3 – substrát s vrstvou nanodrátů, kde byla provedena filtrace.

### 7.9.1 Snímky substrátu se zárodečnou vrstvou



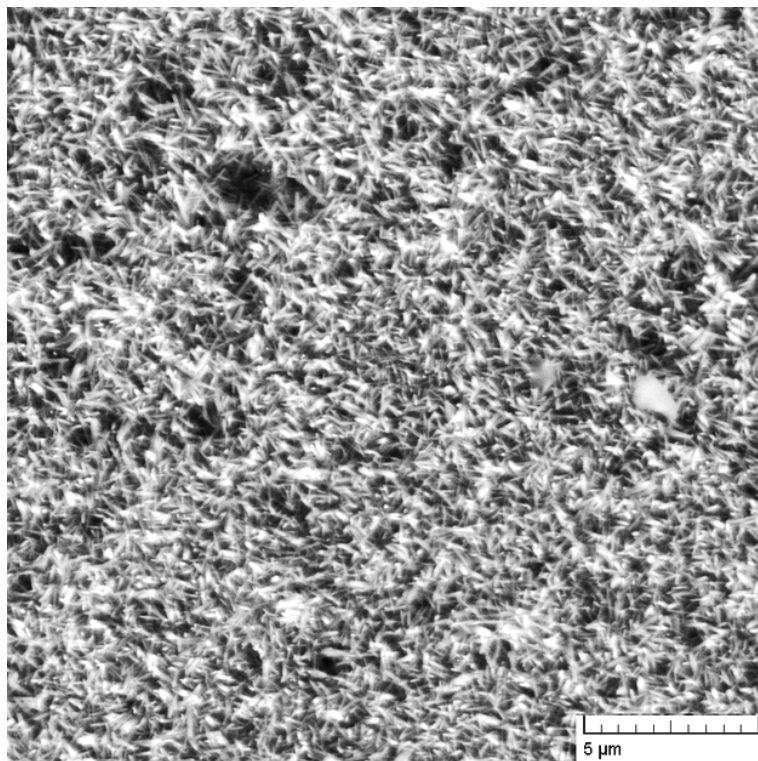
Obrázek 15 Snímek zárodečné vrstvy

Na prvním snímku (Obrázek 15) je zachycena zárodečná vrstva ZnO, která vznikla po spin-coatingu. Vrstva má monolitní charakter a nejsou patrné ani výrazné místa bez pokrytí (přiloženo měřítko 5 μm). Na dalším snímku (Obrázek 16) je stejný substrát ve větším zvětšení (přiloženo měřítko 2 μm). Zde je podrobněji zobrazená zárodečná vrstva a její ucelenost. Výsledkem bylo, že připravený substrát byl vhodný pro hydrotermální syntézu ZnO nanodrátů.



Obrázek 16 Zvětšený snímek zárodečné vrstvy

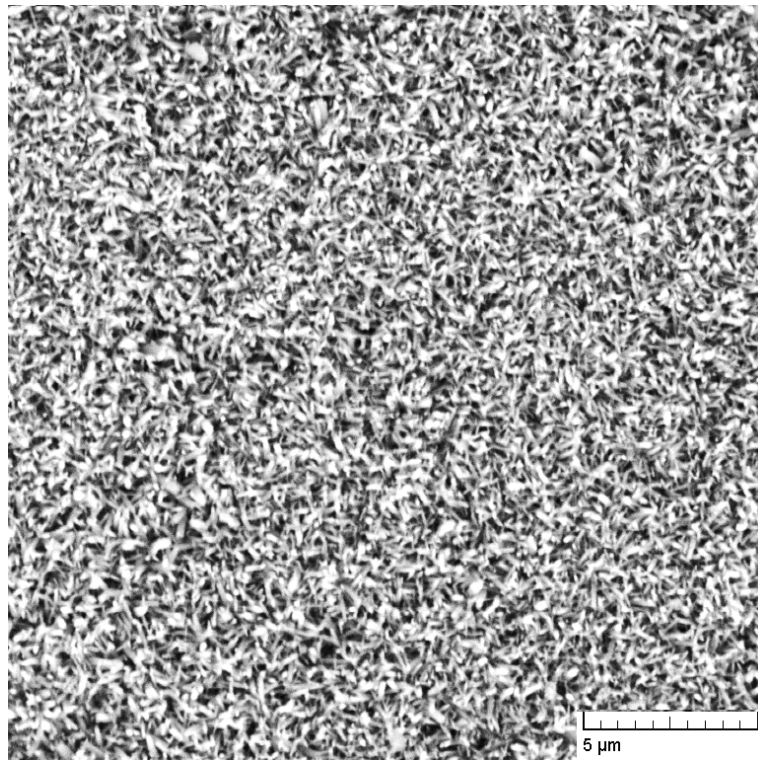
### 7.9.2 Snímky substrátů po hydrotermální syntéze



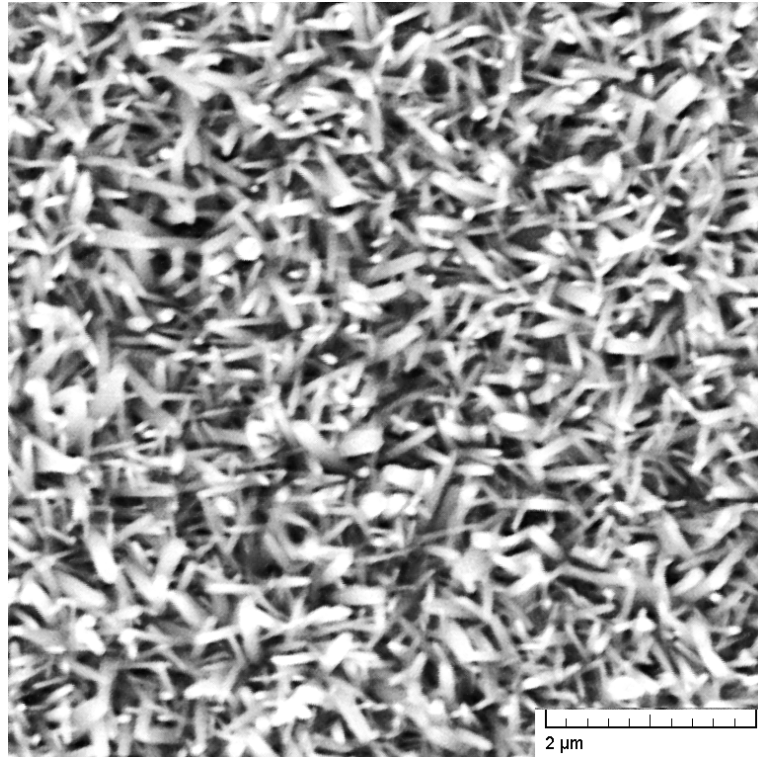
Obrázek 17 Vzorek č. 2 - snímek nanodráťů



Na posledním snímku z předchozí stránky (Obrázek 17) je zachycen vzorek substrátu po hydrotermální syntéze s patrnými místy, kde nejsou zachyceny nanodráty. Ta vznikla nasorbováním bublin vzduchu v roztoku na substrát. Jelikož se jednalo o hydrotermální syntézu, kde teploty se pohybují kolem 80°C, bylo pravděpodobné, i když nepřecházíme v bod varu, že budou vznikat bubliny. Po řadě pokusů odstranit je jsme přišli na způsob, jak je při dané syntéze rapidně zredukovat. Jak již bylo uvedeno v postupu práce, roztok se po krátkém převaření zfiltróval. Zfiltróvané roztoky už nedávali možnost vzniku bublin, a tak se podařilo napěstovat ZnO nanodráty na substrát, aniž by zde byli patrné neobsazené místa (Obrázek 18).



Obrázek 18 Vzorek č. 3 - snímek nanodrátů

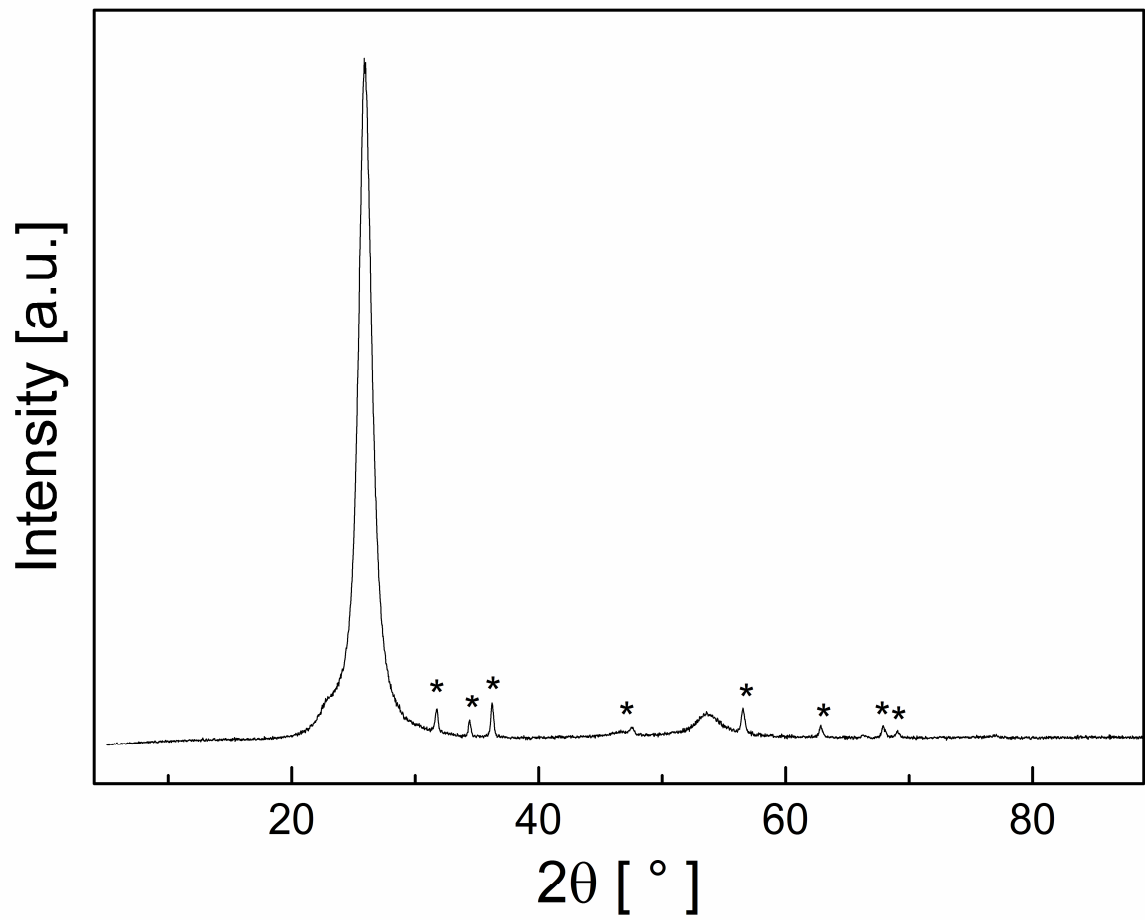


Obrázek 19 Zvětšený snímek nanodrátů na vzorku č. 3

Snímek třetího vzorku je zvětšený a přiložené měřítko je 2  $\mu\text{m}$  (Obrázek 19). Je dobře patrné vytvoření nanodrátů, které mají nahodilé uspořádání. Obecně se nanodráty s vertikálním směrem růstu.

### 7.10 Rentgenová charakterizace

Na Obrázek 20 je X-ray difraktogram PET folie potažené ITO s vypěstovanými ZnO nanodráty. Píky při difrakčních úhlech  $2\theta = 31,7^\circ; 34,4^\circ; 36,2^\circ; 47,5^\circ; 56,6^\circ; 62,8^\circ; 67,9^\circ$  a  $68,9^\circ$  lze jednoznačně přiřadit krystalické struktury Wurtzite ZnO (JCDD PDF-2 entry 01-079-0207). V rozmezí difrakčních úhlů  $2\theta 24,9^\circ$  až  $29,3^\circ$  se nachází pík odpovídající krystalickému podílu PET.



Obrázek 20 Difraktogram

## ZÁVĚR

Byla provedena rešerše na téma ZnO sub-mikro a nanostruktur. V teoretické části jsou postupně popsány a dány do souvislosti vlastnosti, struktura a aplikace ZnO obecně. Dále je podána definice nanostruktur a jejich klasifikace, jsou zmíněny metody jejich přípravy. Pozornost je věnována zejména hydrotermální syntéze ZnO nanodrátů na substrátech a je diskutován vliv proměnných, které mohou syntézu významně ovlivňovat. Na závěr teoretické části jsou stručně vysvětleny principy metod, které byly dále použity k charakterizaci v části praktické.

Na základě rešerše byly vybrány optimální podmínky pro hydrotermální syntézu nanodrátů na substrátu. Jako substrát byla zvolena flexibilní PET folie potažená ITO, která je běžná jako substrát pro tištěnou elektroniku. Jako prekurzory pro růst nanodrátů byly použity vodné roztoky  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a HMTA. Syntéza probíhala bez větších problémů, nutností však bylo doladit vznik defektů, které způsobovaly bubliny v roztoku. To se podařilo díky přefiltrování smíchaných a mírně zahřátých roztoků prekurzorů. Produkty takto nastavené hydrotermální syntézy byly podrobeny mikroskopické charakterizaci a rentgenové analýze, které potvrdily úspěšný růst ZnO nanodrátů na substrátu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] ZHANG, Yangyang, Manoj K. RAM, Elias K. STEFANAKOS and D. Yogi GOSWAMI. Synthesis, Characterization, and Applications of ZnO Nanowires. *Journal of Nanomaterials* [online]. 2012, roč. 2012, s. 1-22. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1155/2012/624520. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/624520/>.
- [2] MOEZZI, Amir, Andrew M. MCDONAGH and Michael B. CORTIE. Zinc oxide particles: Synthesis, properties and applications. *Chemical Engineering Journal* [online]. March 2012, roč. 185-186, s. 1-22. [vid. 2013-10-03]. doi 10.1016/j.cej.2012.01.076. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138589471200099X>.
- [3] OZIN, Geoffrey A, André C ARSENAULT a Ludovico CADEMARTIRI. *Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials*. 2nd ed. Cambridge: RSC Publishing, c2009, liii, 820 s. ISBN 978-184-7558-954.
- [4] MORKOÇ, Hadis a Ümit ÖZGÜR. *Zinc oxide: fundamentals, materials and device technology*. 3rd completely rev. and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH, c2009, xi, 477 p. ISBN 35-274-0813-4.
- [5] RATNER, Mark A a Daniel RATNER. *Nanotechnology: a gentle introduction to the next big idea*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, xiv, 188 p., [16] p. of plates. ISBN 01-310-1400-5.
- [6] LEE, G.H., T. KAWAZOE and M. OHTSU. Room temperature near-field photoluminescence of zinc-blend and wurtzite ZnO structures. *Applied Surface Science* [online]. 2005, roč. 239, č. 34, s. 394-397. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1016/j.apsusc.2004.06.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433204009432>.
- [7] JAGADISH, C, S PEARTON a Bernd RECH. *Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties and applications*. 3rd completely rev. and enlarged ed. Boston: Elsevier, c2006, ix, 589 p. ISBN 00-804-4722-8.
- [8] JANÁČEK, Zdeněk a Petr PONÍŽIL. *Úvod do fyziky pevných látek*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1995, 127 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0700-X.
- [9] WANG, Zhong Lin. ZnO nanowire and nanobelt platform for nanotechnology. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 3. April 2009, roč. 64, č. 3-4, s. 33-71. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1016/j.mser.2009.02.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X09000229>.
- [10] ELLMER, Klaus, Andreas KLEIN a Bernd RECH. *Transparent conductive zinc oxide: basics and applications in thin film solar cells*. 3rd completely rev. and enlarged ed. Berlin: Springer, c2008, xiii, 443 p. ISBN 35-407-3611-5.
- [11] Nanopěna. Pátá forma uhlíku: nanopěna s feromagnetickými vlastnostmi. ALDEBARAN [online]. 2004, roč. 2, č. 5 [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_25\\_uhl.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_25_uhl.html)

- [12] YI, Gyu-Chul, Chunrui WANG and Won Il PARK. ZnO nanorods: synthesis, characterization and applications. *Semiconductor Science and Technology* [online]. 1. April 2005, roč. 20, č. 4, s. S22–S34. [vid. 2013-24-03]. doi 10.1088/0268-1242/20/4/003. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/02681242/20/i=4/a=003?key=crossref.ab004e2de5c4f4c127c2ad9a52c7ac58>.
- [13] UENO, Shintaro and Shinobu FUJIHARA. Controlled synthesis of star-shaped zinc oxide particles at low temperatures and their quantum size effect. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2012, roč. 541, s. 338-345. [vid. 2013-24-03]. doi 10.1016/j.jallcom.2012.06.132. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838812011231>.
- [14] SUE, Kiwamu, Kazuhito KIMURA, Kenji MURATA and Kunio ARAI. Effect of cations and anions on properties of zinc oxide particles synthesized in supercritical water. *The Journal of Supercritical Fluids* [online]. 2004, roč. 30, č. 3, s. 325–331. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1016/j.supflu.2003.09.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0896844603002171>.
- [15] CAO, Guozhong a Ümit ÖZGÜR. *Nanostructures: synthesis, properties*. 3rd completely rev. and enlarged ed. Hackensack, NJ: Imperial College Press, 2004, xiv, 433 p. ISBN 978-186-0944-802.
- [16] Kvantové jámy. Pátá forma uhlíku: nanopěna s feromagnetickými vlastnostmi. ALDEBARAN [online]. 2004, roč. 2, č. 5 [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_25\\_uhl.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_25_uhl.html)
- [17] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 170 s. ISBN 978-80-01-04555-8.
- [18] XU, Sheng, Yue SHEN, Yong DING and Zhong Lin WANG. Growth and Transfer of Monolithic Horizontal ZnO Nanowire Superstructures onto Flexible Substrates. *Advanced Functional Materials* [online]. 2010, roč. 20, č. 9, s. 1493–1497. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1002/adfm.201000230. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.201000230>.
- [19] ZUO, Yan-Bin, Fu-Hua LU, Chang-Long ZHANG, Yin HANG, Wei-Ning ZHOU, Han-De HUO, Shi-Jie QIN, Hai-Tao ZHOU, Xiao-Ling HE, Dong-Ping LI, Hai-Xia ZHANG, Yi-Xin CHEN and Shu-lin GU. Hydrothermal growth of scandium-doped ZnO crystals. *Journal of Crystal Growth* [online]. 2011, roč. 318, č. 1, s. 513–515. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1016/j.jcrysgr.2010.11.088. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022024810010687>.
- [20] SCHUBERT, U a Nicola HÜSING. *Synthesis of inorganic materials*. 3rd completely rev. and enlarged ed. Weinheim: Wiley-VCH, xxii, 370 p. ISBN 35-273-2714-2.
- [21] XU, Sheng and Zhong Lin WANG. One-dimensional ZnO nanostructures: Solution growth and functional properties. *Nano Research* [online]. 15. August 2011, roč. 4, č. 11, s. 1013–1098. [vid. 22. May 2013]. doi 10.1007/s12274-011-0160-7. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12274-011-0160-7>.
- [22] JEONG, Y.I., C.M. SHIN, J.H. HEO, H. RYU, W.J. LEE, J.H. CHANG, C.S. SON and J. YUN. Effects of growth duration on the structural and optical properties of ZnO

nanorods grown on seed-layer ZnO/polyethylene terephthalate substrates. *Applied Surface Science* [online]. October 2011, roč. 257, č. 24, s. 10358–10362. [vid. 2013-29-03]. doi 10.1016/j.apsusc.2011.06.078. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433211009548>.

[23] GHAYOUR, H., H.R. REZAIE, Sh. MIRDAMADI and a.a. NOURBAKHS. The effect of seed layer thickness on alignment and morphology of ZnO nanorods. *Vacuum* [online]. July 2011, roč. 86, č. 1, s. 101–105. [vid. 2013-29-03]. doi 10.1016/j.vacuum.2011.04.025. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042207X11001679>.

[24] JI, Liang-Wen, Shi-Ming PENG, Jun-Sheng WU, Wei-Shun SHIH, Cheng-Zhi WU and I-Tseng TANG. Effect of seed layer on the growth of well-aligned ZnO nanowires. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [online]. October 2009, roč. 70, č. 10, s. 1359–1362. [vid. 2013-29-03]. doi 10.1016/j.jpcs.2009.07.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022369709002133>.

[25] HU, Hanmei, Xianhuai HUANG, Chonghai DENG, Xiangying CHEN and Yitai QIAN. Hydrothermal synthesis of ZnO nanowires and nanobelts on a large scale. *Materials Chemistry and Physics* [online]. November 2007, roč. 106, č. 1, s. 58–62. [vid. 28-28-03]. doi 10.1016/j.matchemphys.2007.05.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0254058407003173>.

[26] ZnO nanorods prepared from various precursor concentrations. [Http://www.hindawi.com](http://www.hindawi.com) [online]. [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/624520/fig4/>

[27] Average diameters, lengths, and aspect ratios of ZnO nanorods. [Http://www.hindawi.com](http://www.hindawi.com) [online]. [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/624520/fig5/>

[28] GUO, Min, Peng DIAO, Xindong WANG and Shengmin CAI. The effect of hydrothermal growth temperature on preparation and photoelectrochemical performance of ZnO nanorod array films. *Journal of Solid State Chemistry* [online]. October 2005, roč. 178, č. 10, s. 3210–3215. [vid. 2013-25-03]. doi 10.1016/j.jssc.2005.07.013. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022459605003282>.

[29] BARUAH, Sunandan and Joydeep DUTTA. pH-dependent growth of zinc oxide nanorods. *Journal of Crystal Growth* [online]. April 2009, roč. 311, č. 8, s. 2549–2554. [vid. 2013-28-03]. doi 10.1016/j.jcrysgro.2009.01.135. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022024809001912>.

[30] BARUAH, Sunandan, Chanchana THANACHAYANONT and Joydeep DUTTA. Growth of ZnO nanowires on nonwoven polyethylene fibers. *Science and Technology of Advanced Materials* [online]. 1. April 2008, roč. 9, č. 2, s. 025009. [vid. 2013-25-03]. doi 10.1088/1468-6996/9/2/025009. Dostupné z: [http://stacks.iop.org/14686996/9/i=2/a=025009](http://stacks.iop.org/14686996/9/i=2/a=025009?key=crossref.0f34d7ea3bd5bbb994702e6f40b28aa6)

[31] Zinc Oxide. WIKIMEDIA FOUNDATION, Inc. Wikipedia: The Free Encyclopedia [online]. 2013 [cit. 2013-11-04]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide)

- [32] TESCAN A.S. *TESCAN: PERFORMANCE IN NANOSPACE* [online]. 2012 [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: <http://www.tescan.com/cz>
- [33] WILLIAMS, David B, C Barry CARTER, Transmission ELECTRON and Microscopy PLENUM. COURSE 146C Synthesis and Electron Microscopy Studies of Zinc Oxide (ZnO ) Nanowires Please read the lab procedure before your experiment ! 2007, roč. 1236, č. 2005, s. 1231–1236.
- [34] Rentgenové záření. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2013-26-05]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Rentgenové\\_zářen%u00ed](http://cs.wikipedia.org/wiki/Rentgenové_zářen%u00ed)
- [35] PANALYTICAL B.V. IS A COMPANY. PANalytical [online]. 2013 [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: <http://www.panalytical.com/XPert-PRO-MRD-XL.htm>
- [36] MLEZIVA, Josef. Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [37] MUCK, Alexander. Základy strukturní anorganické chemie. 1. vyd. Praha: Academia, 2006, 508 s. ISBN 80-200-1326-1.



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

FET	Field Effect Transistors
SAW	Surface Acoustic Wave Resonators
MEMS	Micro-elektromechanické systémy
NEMS	Nano-elektromechanické systémy
PET	Polyethylentereftalát
ITO	Zárodečná vrstva ( $\text{In}_2\text{O}_3$ a $\text{SnO}_2$ )
UV	Ultrafialové záření
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-Emitting Diode
DSSC	Dye-Sensitized Solar Cell
0-D	0-dimenzionální struktury
1-D	1-dimenzionální struktury
2-D	2-dimenzionální struktury
3-D	3-dimenzionální struktury
CVD	Chemical Vapor Deposition
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
MOVPE	Metal Organic Vapor Phase Epitaxy
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PACVD	Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition
LCVD	Laser Chemical Vapor Deposition
ALD	Atomic Layer Deposition
CBE	Chemical Beam Epitaxy
MOMBE	Metal Organic Molecular Beam Epitaxy
PVD	Physical Vapor Deposition

MBE	Molecular Beam Epitaxy
HMTA	Hexamethylentereftalát
PAI	Polyethylenimin
SEM	Snímací elektronový mikroskop
CAS	Označení chemický látek

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Směry, které jsou typické pro Wurtzite strukturu [4].....	13
Obrázek 2 Schematické zobrazení parametrů pro ZnO u struktury Wurtzite [4] .....	14
Obrázek 3 kubická Rocksalt struktura, b) kubická Zinc blende struktura a c) hexagnální Wurtzite struktura. Šedou barvou jsou onačeny atomy zinku a černou barvou jsou označeny atomy kyslíku [4] .....	14
Obrázek 4 Vlevo příklad nanopěny, konkrétně se jedná o uhlíkovou nanopěnu [11] a vpravo příklady nanočástic SiO <sub>2</sub> [12].....	17
Obrázek 5 Příklady nanodrátů s různou velikostí [12] .....	18
Obrázek 6 Příklad 2-D nanostruktury, konkrétně se jedná o InAsSb kvantové jámy, na levém snímku je pomocí rastrovacího tunelovacího mikroskopu zachyceno 2D, na pravém je 3D konstrukce [16] .....	19
Obrázek 7 Schematické nákresy x-dimenzionálních nanostruktur [17] .....	19
Obrázek 8 Příklady ZnO x-D nanostruktur na substrátech [12] .....	20
Obrázek 9 Závislost průměru a délky nanodrátů zleva na koncentraci prekurzorů [26] a na poměru těchto prekurzorů [27].....	28
Obrázek 10 Závislost růstu na čase [30] .....	29
Obrázek 11 Nalevo je zobrazen snímání elektronový mikroskop VEGA 2 LM a napravo je uveden princip jeho funkce [32] .....	30
Obrázek 12 Rentgenové zařízení a schéma principu rentgenového měření [35].....	31
Obrázek 13 Aparatura připravená k hydrotermální syntéze ZnO nanodrátů .....	38
Obrázek 14 Detailní záběr na úchyt vzorku.....	38
Obrázek 15 Snímek zárodečné vrstvy.....	39
Obrázek 16 Zvětšený snímek zárodečné vrstvy.....	40
Obrázek 17 Vzorek č. 2 - snímek nanodrátů.....	40
Obrázek 18 Vzorek č. 3 - snímek nanodrátů.....	41
Obrázek 19 Zvětšený snímek nanodrátů na vzorku č. 3 .....	42
Obrázek 20 Difraktogram .....	43