

doc. RNDr. Jarmila Müllerová, PhD.  
Inštitút Aurela Stodolu  
Elektrotechnická fakulta Žilinskej univerzity v Žiline  
ul. kpt. J. Nálepku 1390  
031 01 Liptovský Mikuláš, Slovensko

**Oponentský posudok na dizertačnú prácu Ing. Marie Netrvalovej:  
Studium morfológie povrchu a optických vlastností transparentných vodivých oxidů**

Dizertačná práca Ing. Marie Netrvalovej predložená na Fakulte strojní Západočeské univerzity v Plzni v doktorském študijnom programe P 2301 sa zaoberá skúmaním vybraných materiálových vlastností tenkých vrstiev dopovaného oxidu zinočnatého, ktoré sú prednostne určené pre tenkovrstvové solárne články ako transparentné vodivé oxidy.

**a) Zhodnotenie významu pre odbor**

Téma patrí do materiálového výskumu v oblasti transparentných vodivých oxidov pre aplikácie v mnohých elektronických a optoelektronických prvkoch vrátane solárnych článkov. V tejto oblasti je žiaduci intenzívny výskum a optimalizácia materiálových vlastností. Preto tému nielen z pohľadu praxe, ale aj vedeckého poznania považujem za aktuálnu.

**b) Postup riešenia, použité metódy spracovania a splnenie cieľov**

Motivácia práce sa dá vydedukovať z textu. Výber dopovaného ZnO ako transparentného vodivého oxidu je primerane zdôvodnený. Ciele sú špecifikované na str. 25. Považujem ich za dizertabilné a po podrobnom preštudovaní práce konštatujem, že boli splnené.

Práca obsahuje experimentálne a interpretačné výsledky týkajúce sa štruktúry, povrchovej morfológie, optických a elektrických vlastností tenkých vrstiev dopovaného ZnO. Skúmanie je založené na viacerých diagnostických technikách, ktoré sú podrobne rozpísané. Spomínané vlastnosti sú vyhodnocované z pohľadu depozičných podmienok a post-depozičného opracovania. Autorka identifikovala tendencie ovplyvňovania vlastností vrstiev rôznymi technologickými podmienkami.

Navrhnuté a použité metódy spracovania sú adekvátne. Výsledky sú primerane graficky prezentované a opatrené komentármi. Práca dokazuje, že dizertantka vie vedecky pracovať s použitím heuristických princípov.

Výsledky sú interpretované popisným spôsobom so snahou o fyzikálne zdôvodnenie. Chýba mi podrobnejšia konfrontácia so súčasným stavom problematiky, syntéza výsledkov a identifikácia kľúčových faktorov, t.j. závery a odporúčania, ktoré by mohli viesť k optimalizácii fungovania zariadení s daným typom TCO.

**c) Stanovisko k dosiahnutým výsledkom a pôvodný prínos predkladateľky**

Originálne výsledky práce zameranej na rozvoj vedeckého poznania sú použiteľné hlavne v súčasných tenkovrstvových solárnych technológiách. Za pôvodný prínos práce považujem získanie a spracovanie rozsiahleho experimentálneho materiálu a konzistentnosť výsledkov viacerých diagnostických metód.

Pri obhajobe prosím dizertantku o zodpovedanie nasledovných otázok:

1. Aké iné opticky transparentné a vodivé materiály (TCM) popri oxidoch poznáte?
2. Pod absorpčnou hranou sa vo všeobecnosti rozumie diskontinuita absorpčného spektra materiálu. Vysvetlite detailnejšie, čo rozumiete pod absorpčnou hranou, akým spôsobom ste vyhodnocovali jej posun a ako súvisí so sklonom nábežnej hrany transmitancie, ktorej zmeny často používate na interpretáciu výsledkov.
3. Principiálne optické charakteristiky sú uvádzané pomocou integrálnej transmitancie definovanej na str. 17, ktorá dáva nejaké číslo. Podľa tohto prístupu ju však môžete vyjadriť v % (čo používate v práci), len ak ju normujete. Voči čomu bola integrálna intenzita [%] normovaná? Bez vysvetlenia je vágne porovnávanie priepustnosti a integrálnej priepustnosti, napr. na str. 45.
4. Zosumarizujte na základe výsledkov práce, aká textúra dopovaného ZnO je optimálna pre jeho použitie v solárnych článkoch?

#### d) Vyjadrenie k formálnej stránke práce

Rozsah samotnej práce je 73 strán; vrátane zoznamu použitej literatúry, zoznamu prác autorky a príloh je to 84 strán. Obsahové členenie je vyhovujúce, rozsah kapitol a ich nadväznosť primeraná. Formálna a grafická stránka je veľmi dobrá. Štylistika je založená na stručnosti, niekedy na úkor postačujúceho vysvetlenia.

Na niektorých miestach sú nepresnosti, ktoré zrejme vznikli nepozornosťou pri písaní alebo kontrole textu, napr. na str.12, parameter  $a/c$  v tabuľke nedostaneme vydelením parametra  $a$  parametrom  $c$ , na obr. 6a nie je čiarkovaná čiara (str.15), vyskytujú sa chyby v číslovaní obrázkov a pod.

Použitá odborná terminológia je vyhovujúca. Práca cituje 58 bibliografických prameňov, z toho 28 článkov v časopisoch. Domnievam sa však, že k danej problematike sa dá získať oveľa viac aktuálnych a relevantných podkladov, z ktorých by bolo možné posúdiť aj tendencie vývoja problematiky. Niektoré položky nemajú predpísanú bibliografickú formu, a teda sa nedajú overiť, resp. získať.

K dizertačnej práci mám nasledovné pripomienky:

- V úvode práce mala autorka jasne a stručne uviesť jej zámer, zdôvodniť význam spracovávanej problematiky a popísať základnú štruktúru práce
- V niektorých obr. sú anglické popisy, v niektorých české. Navyše je tu aj nejednotná terminológia, napr. v niektorých obrázkoch je na zvislej osi „transmission“ (str. 11), inde „transmittance“ (napr. str. 18), v texte a v obr. aj „transmitance“ aj „propustnosť“
- Str. 15 – neurčitá formulácia „sily elektrónovej hustoty“
- Rovnice s výnimkou dvoch nie sú v práci číslované, čo je neobvyklé. Očíslované sú len dve, rovnica (1) na str. 19 a rovnica (3) str. 41. Nie je jasné, ktorá je rovnica (2), na ktorú je odvolávka na str. 41
- Str. 21 –  $m^*$  nie je efektívna hmotnosť hustoty stavov, ale nosičov náboja, chýba vysvetlenie symbolu  $H$  vo vzťahu na tejto strane
- Str.28 – rozbor difrakčného profilu by si zaslúžil nejaký obrázok
- Str.40 – nie je vysvetlené, ktoré štyri vrstvy uvažuje model na obr.25
- Str.59 –ako sa z AFM obrázkov dá posúdiť formovanie prechodovej vrstvy (riadky 8, 9 zdola)?
- Str.63 – podľa obr. 62 veľkosť biaxiálneho napätia s teplotou žihania rastie, ale podľa textu klesá
- Str.65 – nesprávny text obr. 65
- Autorka by sa mala vyvarovať odborného slangu typu „Vrstvy ZnO:Sc jsou dokonce o více než řád nad hodnotami ...“ (str. 47), „teplota 200 °C nemá téměř žádný vliv...“ (str.64, 65) – tu ide o vplyv zvyšovania teploty od pokojovej až do 200 °C
- Nie je jasné, ktoré výsledky sú výsledkami pilotných elipsometrických experimentov, o ktorých sa píše v závere na str. 73

#### e) Vyjadrenie k publikáciám dizertantky

K práci je priložený imponantný zoznam 50 publikácií, z ktorých v 14 figuruje Ing. Netrvalová ako prvá autorka. 16 publikácií je registrovaných databázou Web of Knowledge, z toho 12 v časopisoch indexovaných v databáze Current Contents Connect. Konštatujem, že zoznam prác výrazne prekračuje bežné požiadavky na publikačnú činnosť doktorandov.

#### f) Záverečné vyjadrenie oponenta

Záverom konštatujem, že predložená dizertačná práca Ing. Marie Netrvalovej spĺňa podmienky kladené príslušnými predpismi na dizertačnú prácu. Dizertantka preukázala schopnosť a pripravenosť k samostatnej výskumnej činnosti. Ciele práce boli splnené. Práca prináša nové výsledky z oblasti materiálových vlastností ZnO pre jeho použitie vo funkcii transparentného vodivého oxidu. Odporúčam, aby predložená práca bola prijatá k obhajobe.

doc. RNDr. Jarmila Müllerová, PhD.  
Liptovský Mikuláš 4. 10. 2012

Oponentský posudok  
na dizertačnú prácu **Ing. Marie Netrvalovej**  
**„Studium morfológie povrchu a optických vlastností transparentných vodivých oxidů“**

a) Zvolená téma dizertačnej práce je veľmi aktuálna pre oblasť výskumu nových materiálov, pretože použitie transparentných vodivých oxidov na báze oxidu zinku v solárnej technike, optoelektronike a senzorike je z ekonomického hľadiska veľmi zaujímavé vzhľadom na ľahkú dostupnosť tohto materiálu, ktorý je navyše environmentálne prijateľný. Technológia naprašovania oxidu zinku (ZnO) vo forme tenkých a ultratenkých vrstiev umožňuje rozsiahlu modifikáciu jeho fyzikálnych a chemických vlastností, ktoré sú využiteľné v mikro-/nano-súčiastkach a systémoch.

b) Ciele odpovedajú zameraniu dizertačnej práce, sú špecifikované jasne a boli splnené v celom rozsahu.

Metodológia riešenia je na vysokej úrovni, pretože pre charakterizáciu a vyhodnocovanie štrukturálnych, optických a elektrických vlastností dopovaného ZnO boli použité moderné metódy analýz a merania: röntgenová difrakčná analýza, rastrovacía elektrónová mikroskopia, atómová silová mikroskopia, mechanická profilometria, optická spektroskopia a elipsometria, elektrické Van der Pauw a Hallovske merania.

c) Výsledky dizertačnej práce rozširujú doterajšie poznatky o technológii prípravy a vlastnostiach tenkých vrstiev ZnO a majú význam nielen pre základný výskum, ale aj pri vývoji fotovoltaiických solárnych článkov a optoelektronických súčiastok v UV oblasti.

Za najvýznamnejšie výsledky a prínosy dizertačnej práce považujem:

- Vytvorenie a overenie programov pre vyhodnocovanie optických vlastností tenkých transparentných vrstiev metódou UV/VIS spektrometrie.
- Získanie nových poznatkov o vplyve technologických podmienok pri vysokofrekvenčnom diódovom naprašovaní, podepozičnom žíhaní a iónovom leptaní na vlastnosti tenkých vrstiev dopovaného ZnO. Napríklad:
  - rozdielny vplyv dopantov Al, Ga a Sc na kryštalickú štruktúru vrstiev;
  - pri podepozičnom žíhaní v oblasti teplôt  $\geq 200^{\circ}\text{C}$  nastáva zmena štrukturálnych i optických vlastností vrstiev;
  - existenciu prechodovej vrstvy ZnO na rozhraní sklenená podložka/tenká vrstva s veľmi jemnou polykryštalickou štruktúrou prednostne orientovanou a experimentálne overenie tohto faktu tým, že ultratenké vrstvy ( $\approx 100\text{ nm}$ ) mali

vysoko textúrovanú stĺpikovú štruktúru – tento poznatok otvára cestu využitia týchto vrstiev v nanotechnológiách;

- na základe nových poznatkov boli pripravené tenké vrstvy ZnO dopované Al s elektrickou rezistivitou ( $\approx 10^{-4} \Omega\text{cm}$ ) a optickou transmitanciou ( $\approx 90\%$ ) porovnateľnou so súčasným stavom problematiky.

Otázky a pripomienky:


1. Str. 17, kap. 2.1.4.1.: Definícia transmitancie je chybná – je to pomer intenzít prechádzajúceho žiarenia ku dopadajúcemu žiareniu.
2. Str. 59, posledná veta, nejasné vyjadrenie: Presnejšie vyjadrenie, napr. „Zvýšenie teploty v priebehu naprašovania spôsobuje zvýšenie povrchovej difúzie deponovaných častíc.“
3. Aký má vplyv zmena pracovného tlaku Ar pri vf diódovom naprašovaní (str. 58-62) na podmienky rastu tenkých vrstiev (rýchlosť depozície, kinetická energia deponovaných častíc, stupeň smerovosti alebo izotropnosti depozície) v špecifickom diódovom usporiadaní naprašovacieho systému?
4. Str. 66-67, obr. 68: Mohli by ste vysvetliť pokles veľkosti kryštálov, resp. jej lokálne minimum v oblasti teplôt žihania  $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

d) Práca po formálnej a obsahovej stránke je vyvážená s veľmi dobrou vonkajšou úpravou. Dizertačná práca má 84 strán textu a obrázkov, zoznam symbolov a skratiek, 58 literárnych odkazov, zoznam prác autorky, 2 prílohy: 1. – blokové schéma programu TF SpecFit, 2. - blokové schéma programu TF SpecGap.

e) Dizertantka jednoznačne preukázala schopnosť samostatnej tvorivej vedeckej práce, čo dokumentuje aj jej publikačná činnosť (ako autorka/spoluautorka) a prezentácie na domácich/medzinárodných konferenciách: 1 kniha, 1 kapitola v knihe, 18 článkov v karentovaných časopisoch (4x je prvá autorka), 28 článkov v zborníkoch konferencií (10x je prvá autorka) a 2 softvéry.

f) Na základe celkového zhodnotenia konštatujem, že predložená dizertačná práca spĺňa požiadavky k udeleniu titulu PhD. a **doporučujem** ju k obhajobe (podľa zákona č. 111/1998 Sb. § 47) a po jej úspešnom obhájení udeliť Ing. Marii Netrvalovej vedecko-akademickú hodnosť „Philosophiae Doctor“.

Bratislava, 28.10. 2012

  
Prof. RNDr. Vladimír Tvarožek, PhD.  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ústav elektroniky a fotoniky