

Oponentský posudok
na dizertačnú prácu **Ing. Lucie Prušákovéj**
„Development of transparent conductive oxides for photovoltaic applications“

a) Zvolená téma je veľmi aktuálna pre oblasť výskumu nových materiálov, nakoľko použitie tenkých vrstiev a tenkovrstvových štruktúr pre fotovoltaičné aplikácie je v súčasnosti v centre pozornosti pri vývoji moderných solárnych článkov druhej a tretej generácie. Definované a reprodukovateľné vytváranie transparentných vodivých tenkých vrstiev a ich rozhraní s aktívnymi kremíkovými tenkovrstvovými štruktúrami, ako aj štúdium ich vlastností, sú kľúčovými faktormi pre zvýšenie účinnosti fotovoltaičných solárnych článkov. Použitie transparentných vodivých oxidov na báze oxidu zinku v solárnej technike, ale aj v optoelektronike, je z ekonomického hľadiska veľmi perspektívne vzhľadom na ľahkú dostupnosť tohto materiálu, nízku cenu, ktorý je navyše environmentálne prijateľný.

b) Ciele odpovedajú zameraniu dizertačnej práce a sú jasne špecifikované. Dosiachnuté výsledky (zhrnuté prehľadne v závere) potvrdzujú úspešné splnenie zadaných cieľov.

Dizertačná práca vyčerpávajúco a zrozumiteľne uvádza riešenú problematiku na základe najnovších poznatkov a štúdia veľkého počtu prác (111 literálnych odkazov). Relatívne veľký rozsah teoretickej časti je spôsobený krátkym a výstižným popisom vlastností materiálu ZnO a všetkých použitých technologických i analyzačných metód, ktorá ale vzhľadom na komplexnosť problematiky môže byť pre čitateľov (nie špecializovaných v tejto problematike) užitočná.

Metodológia riešenia má nadštandardnú úroveň, pretože depozícia vrstiev sa uskutočňovala najmä na špičkových zariadeniach a na charakterizáciu a vyhodnocovanie štruktúrnych, optických a elektrických vlastností dopovaného ZnO boli použité moderné metódy analýz a merania: röntgenová difrakčná analýza, rastrovacía a transmisná elektrónová mikroskopia, mechanická profilometria, optická spektrometria, elektrické Van der Pauw a Hallovske merania.

c) Výsledky dizertačnej práce rozširujú doterajšie poznatky o vlastnostiach tenkých vrstiev ZnO pripravených technológiou vysokofrekvenčného (vf) magnetronového naprašovania a majú význam nielen pre základný výskum, ale aj pri vývoji tenkovrstvových fotovoltaičných solárnych článkov. Zvlášť treba vyzdvihnúť, že boli získané nové poznatky vďaka

komplexnému a systematickému prístupu, ktorý zahrňoval aj realizáciu pilotných vzoriek tenkovrstvových fotovoltaiických článkov na báze amorfného Si.

Za najvýznamnejšie výsledky a prínosy dizertačnej práce považujem:

- Získanie nových poznatkov o vplyve technologických podmienok pri vf magnetrónovom naprašovaní, podepozičnom žíhaní a iónovom leptaní na vlastnosti tenkých vrstiev dopovaného ZnO. Napríklad:
 - rozdielny vplyv dopantov Al, Ga a Sc na štrukturálne, elektrické a optické vlastnosti ZnO vrstiev;
 - vplyv umiestnenia podložiek vzhľadom na erozívnu zónu terča a teploty podložiek pri naprašovaní (determinujúci základné fyzikálne procesy rastu tenkých vrstiev) na štruktúru, morfológiu povrchu, rezistivitu a optickú transparentiu ZnO vrstiev dopovaných Sc, pretože získané poznatky a špecifické vlastnosti tohto materiálu (nenulový magnetický moment) ho predurčujú pre širšie využitie v senzorických aplikáciách;
 - experimentálne overená originálna korelácia medzi mriežkovými napätiami a šírkou optického zakázaného pásma ZnO vrstiev dopovaných Al, ktorá môže prispieť ku rozšíreniu súčasných základných znalostí o tomto široko využiteľnom materiáli.
- Vývoj kompletného meracieho systému pre určenie typu vodivosti polovodičov, resp. polovodivých tenkých vrstiev, metódou merania termoelektrického napätia.
- Realizácia laboratórnych vzoriek tenkovrstvových fotovoltaiických solárnych článkov pomocou skúmaných TCO vrstiev a tenkých vrstiev amorfného kremíka (na ktorých sa dizertantka tiež podieľala) – vybrané fotovoltaiické solárne články mali účinnosť porovnateľnú so vzorkami vyrobenými na bázi komerčných ASHAHI U-type vrstiev.

Otázky a pripomienky:

1. Str. 27, kap. 3.2, riadky 3-6: Tvrdenie „This means that in the diode sputtering system the films cannot be formed by an ion plating process, which makes possible to control the microstructure of the growing film by the energy of bombarding ions“ je nejasné - upresnite uvedené vyjadrenie.
2. Str. 28, obr. 3.1: Schématické zobrazenie procesov pri diódovom naprašovaní je veľmi zjednodušené a neodpovedá zložitejším javom pri naprašovaní vrstiev oxidov zinku, ktoré sú popísané v texte.

3. Str. 45, obr. 4.7: Vysvetlite podrobnejšie metodiku merania Seebeckovho napätia vzhľadom na spôsob (dynamiku) ohrevu, ktorej odpovedá prezentovaná závislosť $T = f(t)$ a gradient teploty.

4. Môžete porovnať tenké vrstvy ZnO dopované Al a Ga z hľadiska ich použiteľnosti vo fotovoltaiických solárnych článkoch?

d) Dizertačná práca je napísaná v anglickom jazyku, má zmenšený formát, čo odpovedá súčasným trendom vo svete a je prínosom pre potenciálnu disemináciu výsledkov v medzinárodnom meradle. Práca po formálnej a obsahovej stránke je vyvážená s veľmi dobrou vonkajšou úpravou. Dizertačná práca má 101 strán textu a obrázkov, 111 literárnych odkazov a zoznam prác autorky.

Pripomienky:

5. V práci chýba zoznam symbolov, ktorý je užitočný z hľadiska používania SI jednotiek.

6. Zoznam publikácií doktorandky by bolo vhodnejšie špecifikovať podľa dôležitosti, t.zn. podľa oficiálneho delenia publikačnej činnosti.

e) Dizertantka jednoznačne preukázala schopnosť samostatnej tvorivej vedeckej práce, čo dokumentuje jej publikačná činnosť (ako autorka/spoluautorka) a prezentácie na domácich/medzinárodných konferenciách: 7 článkov v karentovaných časopisoch (3x je prvá autorka), 22 článkov v zborníkoch konferencií, 1 softvér a 3 prototypy/funkčné vzorky.

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. Lucii Prušákovej vedecko-akademickú hodnosť „Philosophiae Doctor“.

Bratislava, 1.10. 2012


Prof. RNDr. Vladimír Tvarožek, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroniky a fotoniky

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. Lucie Prušákovéj: Development of Transparent Conductive Oxides for Photovoltaic Applications

Dizertačná práca Ing. Lucie Prušákovéj predložená na Fakulte strojní Západočeské univerzity v Plzni 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 práce patrí do výskumu obnoviteľných zdrojov energie, preto je aktuálna z pohľadu vedeckého poznania aj z pohľadu praxe. Transparentné vodivé oxidy sú súčasťou tenkovrstvových solárnych článkov, ktorých vlastnosti sa musia optimalizovať. Intenzívny výskum v tejto oblasti je preto žiadúci. Autorka primerane zdôvodnila výber dopovaného ZnO ako transparentného vodivého oxidu a význam jeho skúmania kvôli závislosti jeho vlastností od mnohých ukazovateľov, hlavne depozičných a post-depozičných procesov.

b) Postup riešenia, použité metódy spracovania a splnenie cieľov

Motivácia práce a jej štruktúra sú uvedené na str. 11. Na tej istej strane sú taxatívne vymenované jej ciele. Považujem ich za dizertabilné a po podrobnom preštudovaní práce konštatujem, že boli splnené.

Navrhnuté a použité metódy spracovania sú adekvátne. Grafika prezentovania výsledkov je vhodne zvolená. Diskusia k získaným výsledkom sú postačujúce. Výsledky sú opatrené vecným a fyzikálne primeraným komentárom. Práca dokazuje, že autorka vie vedecky pracovať s použitím heuristických princípov.

c) Stanovisko k dosiahnutým výsledkom a pôvodný prínos dizertantky

Originálne výsledky práce orientovanej kognitívne sú použiteľné v súčasných tenkovrstvových solárnych technológiách. Za pôvodný prínos práce považujem rozsiahly experimentálny materiál opatrený primeraným a vecným komentárom, konfrontáciu výsledkov získaných rôznymi diagnostickými technikami a porovnanie výsledkov s údajmi s literatúry.

Oceňujem zavedenie nového charakteristického parametra vyjadrujúceho vzťah optických a elektrických vlastností materiálu. Za významný benefit považujem zaradenie verifikačných experimentov na reálnych solárnych článkoch.

Pri obhajobe prosím dizertantku o zodpovedanie nasledovných otázok:

1. Zdôvodnite použitie vrstvy ZnO ako spätného reflektora. Aké vlastnosti by mala mať táto vrstva v porovnaní so ZnO v úlohe hornej elektródy?
2. Vysvetlite platnosť Paschenovho zákona (str. 31) v súvislosti s magnetronovým naprašovaním a jeho principiálnymi geometriami a porovnanie s jednoduchými výbojmi.
3. Z textu sa zdá (str.62, str. 100, píše sa tam „for computation we used ...“), že autorka sama výpočtami *ab initio* vytvorila teoretický model dopovaného ZnO (obr.6.2.2 neobsahuje referenciu). Môžete to podrobnejšie vysvetliť? Čo znamená GWA a LDA?
4. Voči čomu je normovaná rezistivita na obr. 6.2.2.5 a 6.2.2.8?

d) Vyjadrenie k formálnej stránke práce

Práca je predložená v anglickom jazyku. Rozsah samotnej práce je 115 strán vrátane zoznamu použitej literatúry a zoznamu prác autorky. Práca je primerane členená, rozsah kapitol a ich nadväznosť vyhovujúca. 46 strán je venovaných súčasnému stavu problematiky vrátane charakterizácie ZnO a popisu

depozičných a diagnostických metód. 10 strán je venovaných detailom vlastných experimentov. Výsledky a diskusia k nim sú prezentované na 40 stranách. Formálna a grafická stránka je veľmi dobrá (výnimkou sú niektoré rovnice s príliš veľkými fontami a na niektorých miestach chyby v písaní indexov). Použitá odborná terminológia je vyhovujúca. Na niektorých miestach sú nepresnosti v anglickej gramatike, ktoré zrejme vznikli nepozornosťou.

Práca cituje 111 bibliografických prameňov, z toho je viac ako 77 % časopiseckých a aktuálnych. Trochu rušivo pôsobí nejednotná bibliografická forma.

K dizertačnej práci mám nasledovné pripomienky:

- str.9 – na zvislej osi obr.1.5 je koeficient absorpcie, nie efektívna optická absorpcia, ako je uvedené v texte pod obr.
- v práci chýba vysvetlenie, čo je to mikrokryštalický kremík
- str.10 – tabuľka 1.1, na ktorú je v texte odvolávka, v práci chýba
- str.14 – čo to znamená, že GaN a zliatiny s AlN a InN sú „rather difficult materials“?
- str. 23, 24 – chýbajú referencie k poznatkom (aj k obr. 2.4 na str.25)
- nie je jasné, ktoré obrázky sú vytvorené autorkou a ktoré sú prevzaté (chýbajú referencie k obr.), niektoré obrázky majú slabšie rozlíšenie
- str. 27 – 28 – jeden odstavec je tam dvakrát, podobne na str. 94, 95 sa opakuje špecifikácia štruktúry
- str. 32 – veličiny na osiach obr.3.3 nie sú vysvetlené
- str.44, 45 – je integrovaný systém na obr. 4.6 vrátane softvéru dielom dizertantky?
- str.46,47 – protirečenie o vysokej a súčasne zanedbateľnej absorpcii
- str.46 – rovnica (15) platí pre len jednoduché rozhranie tenká vrstva - vzduch
- str. 50 – 53 veľa nevysvetlených skratiek
- str.76 – znižovanie kontrastu interferenčných extrémov v spektre transmitancie nie je spôsobené disperziou svetla, ale rozptylom
- str.84 – integrálna transmitancia nemôže byť v %, zrejme máte na mysli priemernú transmitanciu, tak ako správne uvádzate na str. 66
- str.100 – v závere sa píše, že sa skúmal okrem iného index lomu, ale žiadne výsledky som nenašla

e) Vyjadrenie k publikáciám dizertantky

K práci je priložený zoznam 34 publikácií, z ktorých v 12 figuruje Ing. Prušáková ako prvá autorka. 6 publikácií je uverejnených v časopisoch indexovaných v databáze Current Contents Connect. Som presvedčená, že zoznam prác výrazne prekračuje bežné požiadavky na publikačnú činnosť doktorandov.

f) Záverečné vyjadrenie oponenta

Záverom konštatujem, že predložená dizertačná práca Ing. Lucie Prušákovvej vyhovuje podmienkam kladeným príslušnými predpismi na dizertačnú prácu. Dizertantka preukázala schopnosť samostatnej výskumnej činnosti. Ciele práce boli splnené. Práca prináša nové výsledky z oblasti materiálových vlastností dopovaného ZnO pre jeho použitie vo funkcii transparentného vodivého oxidu v tenkovrstvových solárnych článkoch.

Odporúčam, aby predložená práca bola prijatá k obhajobe.



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