

## **Posudok dizertačnej práce**

### **Štúdium mikroštruktúry tenkých vrstiev a povrchov**

**Ing. Veronika Varuňková**

Dizertačná práca Ing. Veroniky Varuňkovej je zameraná na popis, prípravu a diagnostiku tenkých vrstiev hydrogenizovaného amorfného kremíku. Tento materiál má svoje použitie vo fotovoltaických článkoch II. generácie. Príprava tenkých vrstiev amorfného kremíku je zložitý technologický proces, ktorý bol realizovaný pomocou plazmatickej chemickej depozície zo silanu riedeného vodíkom. Miera zriedenia vodíkom sa ukázala, ako významný parameter určujúci stabilitu amorfnej vrstvy. Zriadenie hrá tiež dôležitú rolu pri stabilite vrstvy pri svetelnej expozícii. Vytvorená amorfná vrstva bola skúmaná pomocou mnohých experimentálnych techník. Menovite boli použité: rtg difrakcia, Ramanova a infračervená spektroskopia, ako aj transmisná elektrónová mikroskopia. Tieto techniky umožnili skutočne podrobný náhľad do vnútra amorfnej štruktúry, ktorá zostáva aj napriek mnohoročnému úsiliu experimentátorov a teoretikov nie celkom pochopenou. Získané experimentálne údaje boli neskôr použité na určenie ďalších parametrov, ako sú šírka zakázaného pásu, index lomu a absorpčný koeficient. Na amorfných vrstvách bol tiež skúmaný vývoj kryštalizačného procesu vo vysokoteplotnej komore pomocou rtg difrakcie.

Predložená práca je rozdelená do niekoľkých navzájom logicky prepojených častí: v úvodnej časti sú na niekoľkých stranách popísané princípy a využitie fotovoltaických článkov. Ďalej nasleduje kapitola popisujúca mikroskopické vlastnosti kremíku a jeho amorfnej fáze. Podrobne sú popísané optické vlastnosti, depozičný fázový diagram a stabilita mikrokryštalického kremíku. V ďalšej časti sú explicitne vypísané ciele práce, za ktorými nasledujú opisy vlastných prínosov autorky. Tieto zahŕňajú: depozičné techniky, experimentálne metódy určené na charakterizáciu vrstiev a štúdium vrstiev pomocou iných metodík. Opis vlastného prínosu práce je zakončený degradačnými experimentmi fotovoltaických článkov.

Po podrobnom prečítaní práce musím konštatovať, že ide o skutočne vyzretú prácu, ktorá kombinuje mnohé experimentálne techniky do jedného celku prípravy a diagnostiky tenkých amorfných kremíkových vrstiev. Napriek nesporným kvalitám predloženej dizertačnej práce mám niekoľko pripomienok a otázok na ktoré žiadam odpoveď pri obhajobe práce:

1. Na strane 12 autorka uvádza že: „Fyzika tenkých vrstev pracuje s vrstvami o tloušťkách desetin nanometru do několika desítek mikrometru. „ Toto tvrdenie sa mi zdá byť odvážne vzhľadom na fakt, že typická vzdialenosť medzi atómami je niekoľko desiatí nanometru.
2. Na strane 17 je uvedené, že amorfný kremík je bez pravidelného usporiadania. Žiadam vysvetlenie, ako je to s usporiadaním atómov v amorfnej látke na blízku a strednú vzdialenosť.
3. Na strane 22 sa uvádza experimentálne usporiadanie depozície s excitáciou reakčného plynu na horúcom drôte. Otázka znie, aké je experimentálne usporiadanie tohto zariadenia a aké účinnosti sa dosahujú pri tejto metodike.
4. Experimentálne krivky uvádzané v práci autorka uvádza bez informácie o neistote merania. Aké boli presnosti použitých experimentálnych techník a či nemohlo prísť k skresleniu údajov v dôsledku experimentálnych nepresností.

Podľa pokynov na vypracovanie oponentského posudku konštatujem nasledovné skutočnosti:

- a) Predloženú prácu hodnotím, ako veľmi význačnú v odbore experimentálneho skúmania amorfných štruktúr a materiálov.
- b) Autorka zvolila primeraný postup na splnenie stanovených cieľov. Vysoko hodnotím použitie niekoľkých experimentálnych techník.
- c) Predkladateľka dizertačnej práce dosiahla niektoré originálne výsledky, ktoré v budúcnosti pomôžu rozvoju pracoviska.
- d) Práca je napísaná vo veľmi peknej grafickej úprave a veľmi dobrým štýlom, ktorý čitateľa zaujme.
- e) Autorka predložila zoznam 26 publikácií, v ktorých je 9 krát prvá autorka. Vysoko hodnotím fakt, že publikácie sú písané v spolupráci s rozličnými pracoviskami.
- f) Na záver konštatujem, že predložená práca spĺňa predpoklady kladené na dizertačnú prácu a preto odporúčam prijať prácu na obhajobu a po úspešnej obhajobe udeliť dizertantke titul PhD. v študijnom odbore 3911V016 Materiálové inžinýrství a strojírenská metalurgie.



prof. Ing. Peter Ballo, PhD.

oponent

v Bratislave dňa 8.3.2012

doc. RNDr. Jarmila Müllerová, PhD.

Katedra základov inžinierstva, Elektrotechnická fakulta Žilinskej univerzity v Žiline

Detašované pracovisko Liptovský Mikuláš, ul. kpt. J. Nálepku 1390

031 01 Liptovský Mikuláš, Slovensko

### **Oponentský posudok na dizertačnú prácu Ing. Veroniky Vavruňkovej Studium mikroštruktúry tenkých vrstiev a povrchů**

Dizertačná práca Ing. Veroniky Vavruňkovej predloženej na Fakulte strojní Západočeskej univerzity v Plzni v študijnom programe P2301 Strojní inženýrství sa zaoberá mikroštruktúrnymi vlastnosťami tenkých vrstiev amorfného hydrogenizovaného (a-Si:H) a polykryštalického (poly-c-Si) kremíka, ktoré sú prednostne určené pre fotovoltaičné aplikácie.

#### **a) Zhodnotenie významu pre odbor**

Téma patrí do materiálového inžinierstva v oblasti obnoviteľných zdrojov energie, preto je výsostne aktuálna nielen z pohľadu vedeckého poznania, ale aj praxe. Tenkovrstvové solárne články na kremíkových štruktúrach sú uznávanou technológiou hlavne kvôli nízkym produkčným nákladom. Výskum a-Si:H a poly-c-Si vrstiev vhodných ako absorbéry *p-i-n* solárnych článkov, resp. tandemových článkov sa dlhodobo považuje za významný a progresívny. Dosiachnutie vyššej a stabilizovanej účinnosti je jednou z najintenzívnejších výskumných aktivít v tejto oblasti.

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

Motivácia a ciele dizertačnej práce sú špecifikované na str. 12. Ciele sú explicitne rozpísané na str. 27 a sú dizertabilné. Konštatujem, že predložená dizertačná práca ich spĺňa v plnom rozsahu.

Práca obsahuje experimentálne a interpretačné výsledky. Mikroštruktúra vrstiev je vyhodnocovaná z pohľadu depozičných podmienok a je založená na viacerých diagnostických technikách. Experimentálne výsledky sú podrobne interpretované a konfrontované s teóriou a súčasným stavom problematiky. Kvôli tomu si autorka osvojila teoretické základy i experimentálne zručnosti z viacerých spektrofotometrických metód, transmisnej elektrónovej mikroskopie a röntgenovej difrakčnej analýzy a prejavila schopnosť analýzy a syntézy v ich interpretácii a konfrontácii.

Na základe množstva experimentálnych dát dizertantka vyhodnotila vplyv zriadenia vodíkom v PECVD depozičii, vplyv substrátu a hrúbky vrstiev. Ďalej skúmala účinky termálnej rekryštalizácie vrstiev poly-c-Si na ich mikroštruktúru a stabilitu voči svetelnej degradácii. Identifikovala podmienky začiatku kryštalizácie. Na základe štúdia súvislosti mikroštruktúry a fotodegradácie vyslovila odporúčania pre depozičné podmienky. Zdôraznila kľúčovú úlohu vodíka.

Navrhnuté a použité metódy spracovania sú adekvátne. Diskusie k získaným výsledkom sú postačujúce. Výsledky sú opatrené vecným a fyzikálne primeraným komentárom. Práca spoľahlivo dokazuje, že dizertantka vie vedecky pracovať s použitím heuristických princípov.

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

Pôvodné výsledky práce zameranej kognitívne sú priamo použiteľné v súčasných solárnych technológiách, čo je v práci racionálne zdôvodnené. Dizertantka vyslovuje závery a odporúčania, ktoré vedú k zlepšeniu absorpčných vlastností vrstiev a potlačeniu fotodegradácie.

Za významný prínos práce považujem konzistentnosť výsledkov viacerých diagnostických metód, ktorú autorka primerane komentuje. Hodnotná je snaha o optimalizáciu mikroštruktúry výberom depozičných podmienok.

Pri obhajobe prosím dizertantku o zodpovedanie nasledovných otázok:

1. Ako je definovaný protokryštalický kremík na základe mikroštruktúrnych vlastností (str. 67)?
2. Čo znamená kvantové uväznenie, resp. ohraničenie (angl. quantum confinement) (str.68)?
3. Pozorovali ste nejaké odlišnosti v mikroštruktúre vrstiev deponovaných dvomi popísanými depozičnými zariadeniami za tých istých podmienok?

**d) Vyjadrenie k formálnej stránke práce**

Rozsah práce je 94 strán vrátane zoznamu použitej literatúry. Obsahové členenie je vyhovujúce, rozsah kapitol a ich nadväznosť primeraná. Netradičné členenie úvodu prispieva k vysvetleniu motivácie a aktuálnosti výskumu v tejto oblasti. Praktické časti prevládajú nad teoretickými. Formálna, grafická a štylistická stránka je veľmi dobrá.

Použitá odborná terminológia je vyhovujúca. Práca cituje 87 bibliografických prameňov väčšinou časopiseckého charakteru a aktuálnych, čo potvrdzuje, že predkladateľka prejavuje snahu o rigoróznosť.

K dizertačnej práci mám len nasledovné pripomienky:


- v zozname použitej literatúry nie je jednotný spôsob odkazovania sa na jednotlivé položky,
- na str. 19 na zvislej osi obr. 28 má byť absorpčný koeficient, nie absorpcia.

**e) Vyjadrenie k publikáciám dizertantky**

K práci je priložený zoznam 26 uverejnených článkov a príspevkov z konferencií, kde Ing. Vavruňková figuruje ako prvá autorka alebo spoluautorka. Z nich 10 je registrovaných databázou Web of Knowledge. Zoznam obsahuje okrem iného 5 publikácií v časopisoch indexovaných v databáze Current Contents Connect, 3 príspevky vydané renomovanými inštitúciami (SPIE, IEEE) a jeden článok v časopise indexovanom v Thomson Reuters Master Journal List. Konštatujem, že zoznam týchto prác výrazne prekračuje bežné požiadavky na publikačnú činnosť dizertanta.

**f) Záverečné vyjadrenie oponenta**

Záverom konštatujem, že predložená dizertačná práca Ing. Veroniky Vavruňkovej splňa všetky podmienky kladené príslušnými predpismi (Zákon č. 111/1998 Sb. §47) na dizertačnú prácu. Dizertantka jednoznačne preukázala schopnosť a pripravenosť k samostatnej výskumnej činnosti. Ciele práce boli splnené. Práca prináša nové výsledky z oblasti mikroštruktúry tenkých vrstiev pre solárne aplikácie. Odporúčam, aby predložená práca bola prijatá k obhajobe.

  
doc. RNDr. Jarmila Müllerová, PhD.  
Liptovský Mikuláš 7. 3. 2012