

Oponentský posudok

doktorandskej dizertačnej práce **Ing. Jiřího Vodáka** na tému

„Návrh a realizace zobrazovacího reflektometru 2. generace a jeho aplikace v optické analýze tenkých vrstev“

Dnešnú mikroelektroniku, ale aj veľa iných technológií, si nemožno predstaviť bez aplikácií tenkých vrstiev. Napriek tomu, že na meranie vlastností, prípadne diagnostiku nehomogenít a defektov, možno využiť niekoľko moderných techník, optické metódy tu majú nezastupiteľnú úlohu. Dobre známou technikou umožňujúcou meranie základných optických parametrov je metóda spektroskopickej elipsometrie. Táto metóda dnes dosiahla vysoký stupeň dokonalosti, nie vždy je však elipsometrická metóda výhodná. Aj z tohoto dôvodu bola v posledných rokoch zdokonalovaná podobná metóda založená na snímaní svetla odrazeného z povrchu resp. dolného rozhrania skúmanej vrstvy - tzv. reflektometrická spektroskopická technika. Využitím fotoelektrického snímania odrazeného širokopásmového svetla pomocou CCD kamerových systémov vznikla zobrazovacia spektroskopická reflektometria. Technika zobrazovacej spektroskopickej reflektometrie bola vyvinutá v rámci svetovej odbornej komunity na Ústave fyzikálneho inžinýrství FSI VUT v Brne ako originálna technika, ktorú kolektív tohoto pracoviska aj ďalej rozvíja. Zobrazenie pozorovaného povrchu tenkej vrstvy pomocou plošnej CCD kamery umožňuje merať naraz veľkú plochu a súčasne vyhodnocovať informáciu o základných optických parametroch a hrúbke vrstvy. V literatúre sa optickými parametrami nazývajú súhrnne index lomu materiálu vrstvy, extinkčný koeficient materiálu vrstvy a hrúbka vrstvy. Index lomu a extinkčný koeficient sú optické konštanty.

Odtiaľto vyplýva aktuálnosť tématiky zvolenej ako predmet dizertačnej práce, keďže sledovanie vlastností a parametrov resp. defektov rôznych tenkých vrstiev či už vo výskume alebo v aplikovaní technológií tenkých vrstiev, je často primárnou diagnostickou úlohou.

Jadro predkladanej práce tvorí riešenie aplikačnej úlohy návrhu a konštrukcie originálneho zariadenia na meranie hrúbky tenkých vrstiev a ich variácií, ako aj vyhodnotenie optických vlastností vrstvy. Jedná sa o zariadenie so špičkovými parametrami, ktoré dnes umožňuje pokrok v optických elementoch, zdrojoch ale aj vhodných kamerových detektoroch širokopásmového žiarenia od UV oblasti po blízku infra oblasť (NIR). Zdôrazniť je treba aj vyvinutý spôsob spracovania získavaných dát pomocou štatistickej regresnej analýzy.

Po formálnej stránke je práca koncipovaná správne, obsahuje potrebné časti a ciele a zámery sú vhodne formulované. K tomu snád' uvediem poznámku, že ciele práce bývajú obvykle formulované v samostatnom odstavci, z úvodných viet k jednotlivým kapitolám však výskumné ciele vyplývajú. Grafické ilustrácie a používanie jednotiek zodpovedajú existujúcim normám. Množstvo a výber citovaných zdrojov literatúry týkajúcej sa danej problematiky sú optimálne, pritom to nie je len vymenovanie zdrojov, ako tak súvisiacich s problematikou. Niektorým

referenciám (napr. [6], [8], [18], [32]) chýbajú odkazy na titul časopisu resp. vydavateľstva a roku vydania. V práci je široko opísané riešenie jednotlivých technických problémov, niektoré opisy optických resp. optomechanických prvkov sa zdajú byť zbytočne podrobné.

Čo sa týka základného princípu vyhodnotenia dát získavaných zobrazovacou spektroskopickou reflektometriou, ten je v práci vysvetlený v odstavci 3.8.2 Měřený signál. Zdá sa mi však, že v práci mohol byť aspoň v krátkosti vysvetlený interferometrický jav využitý na určovanie hrúbky transparentnej vrstvy. Myslím tým napr. článok už z roku 1983, (Swanepoel R., J. Phys. E: Sci Instrum., 16, 1983), prípadne i prácu (Poelman D., Smet P.F. J. Phys. D. Appl. Phys. 36, 2003), ktoré sú prvými fundovanejšími článkami o tom, ako vyhodnotiť hrúbku tenkej vrstvy pomocou snímania spektroskopickou reflektometrickou sondou, aj keď iba pri kvázibodovom meraní. Stačilo by uviesť niektorý z obrázkov z publikovaných výsledkov výskumného kolektívu Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT napr. Fig. 2 (Nečas D. et al., J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 11, 2009) alebo Fig. 5 (Ohlídal M. et al., Meas. Sci. Technol. 22, 2011). Najmä pre čitateľa práce, ktorý nie je špecialistom v danej metodike, by sa orientácia v práci zjednodušila.

K obhajobe mám nasledujúce otázky:

- Vyvinutý prístroj zobrazovacej spektroskopickéj reflektometrie meria hrúbky tenkých vrstiev na podložke – substráte. Čo v tomto prípade znamená pojem „tenká vrstva“ - v akom rozmedzí hrúbok (orientačne) je prístroj schopný spoľahlivo vyhodnotiť hrúbku (akú najmenšiu resp. najväčšiu hrúbku)?
- Vedeli by ste aspoň približne charakterizovať presnosť určenia jednak hrúbky vrstiev, ale aj optických konštánt ?
- V odkazoch na publikované práce, kde výsledky sa merali vyvinutým zobrazovacím reflektometrom, sa o.i. určujú neuniformity resp. nekonštantnosť hrúbky po ploche vzorky. V tenkých vrstvách, ktoré sú deponované na substráte sa môže niekedy vyskytnúť aj určitá nehomogenita optických konštánt po hrúbke vrstvy (kolmo k rozhraniu vrstvy). Mám na mysli vrstvy niekoľko desiatok nm hrubé z takých materiálov ako sú napr. nitridy či karbidy, ktoré vytvárajú na rozhraní substrát-vrstva prechodový gradient zvyškových napätí a ovplyvňujú tak aj index lomu. Podľa Vášho názoru, mohol by tento faktor výraznejšie ovplyvniť vyhodnotenú výsledky hrúbky vrstvy ?
- V závere (s. 67) sa píše, že ISR technika má niektoré neprekonateľné obmedzenia. Mohli by ste uviesť, ktoré máte na mysli ?

Pri komplexnom zhodnotení predkladanej písomnej práce k dizertačnej skúške môžem konštatovať, že práca napriek svojmu aplikačnému zameraniu, prezentuje aj originálne výsledky a je tak prínosom v danej oblasti výskumu. Doktorand svojou prácou dokázal úspešne rozvinúť doteraz dosiahnuté poznatky medzinárodne akceptovaného vedeckého tímu, v ktorom počas doktorandského štúdia výskumne pracoval. Za hlavnú hodnotu a prínos do problematiky zo strany doktoranda považujem metodicky komplexný prístup k téme doktorandskej práce. Osobitne chcem vyzdvihnúť skonštruovanie originálneho zariadenia na meranie základných charakteristík tenkých vrstiev, keďže bol vyvinutý sofistikovaný prístroj zobrazovacieho spektroskopického reflektometra, ktorý je i bude užitočným nástrojom pri výskume, či diagnostike tenkých vrstiev. Doktorand tak preukázal svoju spôsobilosť na samostatnú tvorivú vedecko-výskumnú prácu. Ciele práce boli splnené.

Na základe týchto skutočností, ako aj erudovaného prístupu k spracovaniu tématiky konštatujem, že **práca spĺňa kritériá** stanovené pre dizertačnú prácu a **odporúčam** ju prijať k obhajobe. Zároveň **odporúčam**, aby po úspešnej obhajobe dizertačnej práce bol Ing. Jiřímu Vodákovi **udelený akademický titul PhD.**

V Bratislave, 03.02.2017



Mgr. Milan Držík, CSc

samostatný vedecký pracovník
Medzinárodné laserové centrum

Vyjadrenie k tézam

doktorandskej dizertačnej práce Ing. Jiřího Vodáka na tému

„Návrh a realizace zobrazovacího reflektometru 2. generace a jeho aplikace v optické analýze tenkých vrstev“

Obsah práce:

Práca sa zaoberá štúdiom viacerých problémov a princípov činnosti techniky zobrazovacej spektroskopickkej reflektometrie s nasledujúcim vývojom prístroja reflektometra. Uvádzajú sa viaceré využitia zariadenia na meranie optických konštánt a plošných variácií hrúbok tenkých vrstiev z rôznych materiálov deponovaných na substrátoch.

Súčasný stav riešenej problematiky:

V práci sa opisujú princípy dnes existujúcich optických i konštrukčných schém a štatistických postupov vyhodnotenia dát získavaných zobrazovacími reflektometrami a konfrontácia výhod a obmedzení voči technike spektroskopickkej elipsometrie, ktoré sú charakteristické pre rôzne druhy reflektometrov i elipsometrov. Opísanie problematiky súčasného stavu riešenia študovaných problémov i konštrukčných riešení poskytuje ucelený obraz o tematike. Problematiku práce môžeme hodnotiť v každom prípade ako aktuálnu a smery rozvoja jednotlivých prezentovaných experimentálnych metód a postupov a analýzy získavaných výsledkov môžeme považovať za perspektívne.

Cieľ práce:

Na základe rôznych modifikácií techniky zobrazovacej reflektometrie a na základe vzájomného porovnania ich charakteristík a výhod resp. nevýhod, vytypovanie optimálneho riešenia a návrh zostavy s následnou realizáciou pokročilého zariadenia zobrazovacieho spektroskopického reflektometra. Ciele práce tak, ako boli deklarované, boli splnené.

Zvolené metódy spracovania:

Na riešenie problematiky realizácie pokročilého systému spektroskopického reflektometra bol zvolený metodicky správny postup. Teoreticky boli naštudované existujúce riešenia a existujúce problémy a na základe tejto analýzy boli navrhnuté možné spôsoby riešenia. Na základe oboznámenia sa s potrebnými vlastnosťami a parametrami jednotlivých optických a optomechanických prvkov bol urobený výber základných komponentov zostavy prístroja. Použité postupy riešenia problému vyhodnotenia primárne získavanej informácie pomocou štatistických postupov regresnej analýzy možno považovať v danom prípade za jedine vhodné a správne riešenie.

Hlavné výsledky práce:

V rámci práce bol vyvinutý prístroj založený na technike zobrazovacej spektroskopickkej reflektometrie, ktorý spĺňa požiadavky na najnáročnejšie aplikácie danej techniky vo výskume a prípadne i v bežnej diagnostike základných vlastností

tenkých vrstiev. Práca napriek svojmu aplikačnému zameraniu, prezentuje aj originálne výsledky a je tak prínosom v danej oblasti výskumu. Doktorand svojou prácou dokázal úspešne rozvinúť doteraz dosiahnuté poznatky medzinárodne akceptovaného vedeckého tímu, v ktorom počas doktorandského štúdia výskumne pracoval.

Záver:

Napriek niektorým pripomienkam, práca priniesla nové výsledky a poznatky a je tak značným prínosom v danej oblasti výskumu.

Literatúra:

Množstvo a výber citovaných zdrojov literatúry týkajúcej sa danej problematiky sú optimálne, tematicky súbor prác zodpovedá účelu a cieľom práce. Zoznam obsahuje aj práce autora uverejnené v medzinárodne akceptovaných vedeckých časopisoch.

V Bratislave 3.02.2017



Mgr. Milan Držik, CSc
samostatný vedecký pracovník
Medzinárodné laserové centrum