

## **Oponentský posudek na disertační práci Ing. Alexandra Belosludtseva:**

### **Výsokovýkonové pulzní reaktivní magnetronové naprašování oxidových a oxynitridových vrstev**

Předkládaná disertační práce se zabývá převážně experimentálním studiem nového systému s HIPIMS pulzním magnetronem pro reaktivní naprašování oxidových a oxynitridových tenkých vrstev. Jedná se převážně o vrstvy  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  a  $\text{Hf-O-N}$ . Pro reaktivní HIPIMS depozici cílových oxidů je použito originální řízení pulzního dávkování reaktivního plynu do prostoru vysoké ionizace a disociace v HIPIMS plazmatu, které zajišťuje velmi vysokou depoziční rychlost a zároveň přesnou stechiometrii, vysoký index lomu, nízký koeficient extinkce a vysokou hustotu deponované vrstvy. U této metody není potřeba žádného dalšího senzoru do zpětnovazebního řízení jako je emisní signál z plazmatu signál z lambda sondy atd. Tato metoda je tedy velmi perspektivní pro budoucí využití v průmyslu. Disertační práce se skládá z obecného úvodu, kde je popsán princip použité metody a současný stav problematiky. V následující kapitole jsou prezentovány cíle práce. Další část tvoří preprinty pěti vědeckých publikací publikovaných v impaktovaných časopisech, kde disertant je buď hlavním autorem nebo spoluautorem. Je třeba podotknout a ocenit, že je na začátku této kapitoly jasně uvedeno jaké úkoly a problematiku řešil sám disertant a jaké spoluautoři přiložených publikací. Uvedené publikace tvoří logický celek vlastní práce i s důkladnou diskusí výsledků publikovaných v jednotlivých publikacích. Velká část je věnována depozicím optických vrstev  $\text{HfO}_2$ , kde je podrobně popsán depoziční proces, diskuse výsledků a srovnání nové metody depozice se stávajícími. Je také zařazena práce, která se věnuje hydrofobním vrstvám  $\text{HfO}_2$ , kde kontaktní úhel je kontrolován tloušťkou vrstvy. Tuto práci je třeba zvlášť ocenit, protože se jedná o úplně nové fyzikální poznatky těchto materiálů publikované disertantem v prestižním časopise APL. Další část disertace se věnuje depozicím vrstev  $\text{Hf-O-N}$  s kontrolovatelnou kompozicí a tak i dalších elektrických a optických vlastností. Následuje poslední práce týkající se vrstev  $\text{ZrO}_2$  s gradientní  $\text{ZrO}_x$  mezivrstvou vytvořenou pro zvýšení adheze k ocelovému substrátu.

Je třeba konstatovat, že disertace je zpracována přehledně na velmi vysoké úrovni a obsahuje originální kvalitní vědecké poznatky, které byly publikovány v prestižních časopisech. Práce tedy rozsahem i kvalitou určitě splňuje všechny požadavky kladené na disertační práci. Všechny plánované cíle byly splněny. Je vidět, že disertant prokázal schopnosti samostatné

vědecké práce. Je třeba dále konstatovat, že předkládaná práce je zároveň cenným vědeckým materiálem, ve kterém čtenář najde celou řadu cenných poznatků v oboru depozice oxidových tenkých vrstev pro optické aplikace. Práce je také kvalitně zpracována i po formální stránce v AJ bez gramatických chyb.

Z výše uvedených důvodů doporučuji práci k obhajobě a udělení titulu Ph.D.

Na závěr bych rád položil několik drobných dotazů k vlastní práci:

- 1) V prvním příloženém článku o nanášení  $\text{HfO}_2$  vrstev je prezentována depozice optických vrstev  $\text{HfO}_2$  s unikátními optickými vlastnostmi tzn. vysokým indexem lomu a malým extinkčním koeficientem. Dále je dosaženo i velké depoziční rychlosti ( $\approx 3.3$  nm/s) což je podstatně vyšší hodnota než pro klasické reaktivní magnetronové naprašování se zpětnovazebním řízením. Bylo by možné porovnat odhadem depoziční rychlost nové prezentované metody r-HIPIMS s klasickým reaktivním magnetronovým naprašováním se zpětnovazební regulací reaktivního plynu při nějaké referenční hodnotě středního výkonu na jednotku plochy terče obdobné pro obě metody ?
- 2) V publikaci o rychlé depozici  $\text{HfO}_2$  vrstev je uvedena maximální teplota substrátu ( $\approx 160^\circ \text{C}$ ) na kterou se zahřeje během depozice. Bylo by možné odhadnout tepelný tok na substrát během depozice pro tyto podmínky ?
- 3) Optické tenké vrstvy s vysokým indexem lomu a nízkým extinkčním koeficientem jsou velmi žádané pro praktické aplikace (vrstvy na optické komponenty, optiku atd.) Důležitým parametrem je povrchová struktura vrstvy z hlediska adheze, mikrootvorů (pinholes) atd. Tyto vlastnosti určují životnost těchto prvků a dále jejich použitelnost pro další aplikace např dielektrických vrstev. Bylo by možné ohodnotit novou metodu r-HIPIMS z tohoto hlediska při její aplikaci na studované tenké vrstvy ?

12. 1. 17



Mgr. Zdeněk Hubička, Ph.D.  
Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.  
Na Slovance 2 Praha 8



KATEDRA FYZIKY FEL ČVUT, TECHNICKÁ 2  
166 27 PRAHA 6, ČR  
Tel. 02 420 224 352 333  
Fax: 02 420 233 337 031  
E-mail: pekarek@fel.cvut.cz  
<http://fyzika.fel.cvut.cz/>

**Oponentský posudek doktorské dizertační práce:**

*Výsokovýkonové pulzní reaktivní magnetronové naprašování oxidových a oxynitridových vrstev.*

**Dizertant:** *Ing. Alexandr Beloshudtsev.*

**Školitel:** *prof. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc.*

**Školící pracoviště:** *Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd.*

**Obor:** *Fyzika plazmatu a tenkých vrstev*

• **Zhodnocení významu disertační práce pro obor.**

Oponovaná dizertační práce se zabývá atraktivní problematikou magnetronového naprašování oxidových a oxynitridových vrstev. Oxidy a oxynitridy přechodových kovů jsou třídou materiálů s dosud ne zcela prozkoumanými optickými, elektrickými, mechanickými a hydrofobními vlastnostmi. Tyto vrstvy mohou mít značný potenciál pro průmyslové aplikace. Práce vznikla na katedře fyziky FAV ZČU a v NTIS, Evropského Centra Excelence ZČU.

Důležitost problematiky disertační práce je dokumentována velkým množstvím prací, které jsou každoročně z této oblasti publikovány. Jak autor dizertace uvádí, dizertace byla finančně podporována následujícími granty: SGS–2010– 070 (2010–2012): Advanced thin-film materials and new plasma sources, SGS–2013– 045 (2013–2015): New thin-film materials and plasma deposition systems, a nakonec SGS–2016–056 (2016–2018): New nanostructured thin-film materials formed by plasma technologies. Z dedikací článků, tvořících těžiště dizertace však také plyne, že dizertace byla také podporována například GA ČR.

• **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle.**

Pro zpracování dizertace použil autor postup vycházející především z popisu současného stavu poznání dané problematiky (první kapitola), stanovení cílů (druhá kapitola), dosaženým výsledkům (třetí kapitola) a závěrům disertační práce. Tento postup autor rozvedl do šesti kapitol.

Těžištěm práce je však třetí kapitola, která je rozdělena do pěti částí prezentovaných v podobě článků již publikovaných (tři články) nebo předložených k publikaci (dva články) v prestižních mezinárodních časopisech. V závěru práce je také uveden přehled dalších vlastních publikací disertanta.

Zvolenou metodu zpracování disertační práce tedy považuji za velmi vhodnou, neboť umožňuje čtenáři získat rychlé informace o splnění jednotlivých dílčích cílů. Z porovnání cílů dizertace definovaných 5 dílčími úkoly ve druhé kapitole a dosažených výsledků plyne, že stanovené cíle byly splněny.

**a) Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce.**

I když jsou v práci obsaženy i kvalitativní teoretické úvahy, dizertace je především prací experimentální. Autor získal řadu nových unikátních výsledků týkajících se výsokovýkonového pulzního reaktivního magnetronového naprašování oxidových a oxynitridových vrstev a jeho výsledky významně přispěly k pochopení mechanismů probíhajících při těchto procesech.

Dosažené výsledky se týkají velmi rozsáhlé problematiky a mohou konstatovat, že významně obohacují znalosti týkající se přípravy a diagnostiky multifunkčních HfO<sub>2</sub> a Hf-O-N vrstev, a vrstev ZrO<sub>2</sub> s gradientem ZrOx mezivrstev. Tyto výsledky mohou být také významným přínosem pro praktické aplikace i například s ohledem na skutečnost, že vrstvy mohou být vytvářeny bez vnějšího ohřevu.

S ohledem na skutečnost, že je však disertační práce je předkládána k získání akademického titulu doktor v oboru Fyzika plazmatu a tenkých vrstev chci požádat o dizertanta o vysvětlení pojmu:

- „magnetically enhanced glow discharge“? Co konkrétně u doutnavého výboje je intenzifikováno (enhanced)?

Dále bych rád požádal dizertanta o jeho stanovisko k následujícím dvěma otázkám:

- V disertaci je zmíněno nebezpečí zkratu ke kterému u vysokovýkonového pulzního magnetronu může dojít při vysokých plošných hustotách výkonu a při delších napěťových pulzech. Jaký je však mechanismus procesů vedoucích k tomuto jevu? Z práce A totiž plyne, že množství kyslíku dodávaného do výboje hraje významnou roli pro zamezení zkratu. Může vznik tohoto jevu zamezit kromě injekce plynu, nebo injekce různých plynů také například zvýšení magnetické indukce?
- Ovlivňuje magnetické pole difuzi plazmatu? Existuje v této souvislosti optimální orientace vektoru magnetické indukce vzhledem ke komoře magnetronu?

**b) Vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce.** Dizertační práce, která má 78 stran, je předkládána v anglickém jazyce. Obsahuje integrující část psanou autorem, pět článků, které byly publikovány v prestižních časopisech, shrnutí výsledků, seznam publikací autora a resumé v češtině a v ruštině.

V integrující části, se autor disertace někdy nevyhnul určitým věcným i jazykovým neobratnostem, například ve formulacích typu:

- „The electrical discharge is generated by applying an electrical voltage“.
- „applied power is limited (Wcm<sup>-2</sup> or less)“. Několik řádků níže je veličina se stejným rozměrem nazývána „power densities of the order of kWcm<sup>-2</sup>“.
- „and does not allow for generation of high density plasma“.

Celkově však lze konstatovat, že angličtina integrující části práce je velmi kvalitní, text je čtivý a hovoří o tom, že autor disertace tento jazyk velmi dobře ovládá.

Po formální stránce je práce zpracována profesionálně, přehledně a na výborné úrovni.

**c) Vyjádření k publikacím studenta.**

Disertace Ing. Belosludtseva je předložena ve formě pěti článků, kterým předchází integrující text uvádějící do problematiky vysokovýkonového pulzního reaktivního magnetronového naprašování oxidových a oxynitridových vrstev. Tři z těchto článků již byly publikovány v prestižních impaktovaných časopisech (Surface & Coatings Technology, Thin Solid Films, Applied Physics Letters) a dva z těchto článků již byly k publikaci zaslány do časopisů Ceram. Int. and J. Vac. Sci. Technol. A. V souvislosti s těmito dvěma posledními články chci zdůraznit, že Ing. Belosludtsev je uváděn jako první autor.

Kromě těchto prací seznam publikací Ing. Belosludtseva zahrnuje další dva články zasláné k publikaci do prestižních časopisů a dále 22 příspěvků jak na domácích tak i na mezinárodních konferencích.

Lze tedy konstatovat, že publikační činnost dizertanta má vynikající úroveň.

**d) Jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě.**

Disertaci Ing. Belosludtseva hodnotím jako velmi kvalitní, a je zřejmé, že dizertant prokázal schopnost k samostatné tvořivé práci. Není pochyb o tom, že během svého postgraduálního studia intenzivně

studoval literaturu, vykonal velký kus experimentální práce a přispěl tak k rozvoji poznání ve studovaném vědním oboru. Dizertační práce také svědčí o schopnosti autora vysvětlit pozorované jevy a o schopnosti jasně formulovat závěry. Z uvedených důvodů disertační práci jednoznačně doporučuji k obhajobě.

Praha 13. 1. 2017



Prof. Ing. Stanislav Pekárek, CSc.  
Katedra fyziky FEL, ČVUT Praha .