

## Oponentský posudek na doktorskou práci

**Název práce:** Probe methods for deposition of plasmatic systems for deposition of thin films

**Autor práce:** Mgr. Michal Zanáška

**Oponent:** doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.

Předložená disertační práce je věnována studiu diagnostiky nízkoteplotního plazmatu pomocí invazivních sondových měření. Práce je experimentálního charakteru a cílí zejména na pokročilou sondovou diagnostiku reaktivních výbojů provozovaných v pulzním režimu. Reaktivní a pulzní výboje jednoznačně dominují v technologických aplikacích, protože umožňují přípravu komponentních vrstev unikátních vlastností; typickými příklady mohou být např. fotokatalytické vrstvy  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nebo třeba perovskity BSTO. Bohužel v těchto případech často selhávají konvenční metody nezbytné diagnostiky a to z důvodu depozice parazitních vrstev i na aktivních částech diagnostických nástrojů. Typickým příkladem jsou (Langmuirova) sondová měření, kdy parazitní vrstva neznámého odporu deponovaná na sondu ovlivňuje měřenou voltampérovou charakteristiku. Její zpracování je pak zatíženo velkou chybou nebo dokonce není vůbec možné. Autor práce se striktně soustředí na sondovou diagnostiku a v rámci práce se snaží nalézt a předložit metodiky vhodné i pro měření v reaktivních výbojích. Další rozšíření je věnováno o diagnostiku s relevantním časovým rozlišením. V práci jsou postupně představeny metody plovoucí harmonické sondy (dále FHP – *floating harmonic probe*), impedanční spektroskopie (IS) které jsou srovnány s klasickou a dobře známou teorií Langmuirovy sondy (LP). Je tedy zřejmé, že práce je vysoce aktuální a míří na palčivý problém technologických plazma-depozičních procesů, které vyžadují *in-situ* a *in-time* zpětnovazebou diagnostiku pro optimalizaci depozičního procesu.

Práci, sepsanou v monografickém stylu, shledávám na vysoké odborné úrovni. Celkový rozsah je přibližně 90 stran kvalitního, kultivovaného, anglického textu. První kapitola je věnována teoretickému popisu LP, FHP a IS metod. Tato kapitola, byť teoretická, si zaslouží samostatný komentář, protože ji považuji za mimořádně přínosnou. Rozhodně se nejedná o jednoduchý kompilát již publikovaných prací, ale o velmi pečlivě a zvláště detailně popsanou teorii, kde z pozadí matematického aparátu plynou důsledky, rozdíly a výhody jednotlivých popisovaných metod. Celá tato první kapitola je psána uniformě a s jednotným značením veličin což výrazně usnadňuje orientaci v textu. Poté následuje popis experimentálního zařízení a jednotlivých používaných diagnostických systémů (schémata zapojení měřících přístrojů). Zhruba padesát závěrečných stran je věnováno vlastní diagnostice různými metodami v různých typech výbojů. V rámci práce autor cituje na 80 původních prací; odkazy jsou správně umístěny a jejich výběr vesměs pokrývá celé aktuální spektrum známých článků. Celá práce má velmi dobrou logickou strukturu, která ústí v monolitický celek, který je sice hutný, ale přesto čtivý. Stejně tak je práce na vysoké formální úrovni; práce je prostá pravopisných chyb či překlepů, úroveň angličtiny je dobrá, obrázky snadno čitelné a graficky dobře zvládnuté, text vysázený v LaTeX.

Je zřejmé, že rozsah vlastní experimentální práce je velký a evidentně musel přesahovat data prezentovaná v disertační práci. Jednotlivá měření jsou pečlivě zpracována, prezentována a diskutována. Dále je evidentní, že práce je originální a obsahuje výsledky dosažené během studia; autor se vyhýbá vágním popisům a uváděním obecně známých věcí. Získané výsledky byly publikovány v prestižních impaktovaných zahraničních časopisech, doktorand uvádí celkem 3 původní články, na nichž je vždy uveden jako první autor. Tyto články před svým zveřejněním prošly náročným recenzním řízením. Z tohoto důvodu necítím potřebu se ke kvalitě dosažených výsledků a jejich správnosti vyjadřovat v tomto posudku. Mimoto se student zúčastnil mezinárodních konferencí, kde byly výsledky rovněž prezentovány; celkem 12 příspěvků, z nichž je autor této práce vesměs vždy uváděn na prvním

místě v autorském kolektivu příspěvku. Uvedený počet prací považuji za zcela dostatečný. Předložené články jsou kvalitní a z vlastní zkušenosti vím, že jejich publikace je náročnější než třeba v oblasti materiálového výzkumu (časová náročnost, vývoj metodiky a postupu, verifikace, zpracování velkého objemu dat a výrazně užší zainteresovaná komunita).

Za nejhodnotnější považuji diskusi a vzájemné srovnání metod prezentované a diskutované v rámci kapitol 3 a 4. Autor názorně ukazuje, že není možné přímočaře a jednoduše odpovědět která sondová diagnostika je „nejlepší“. Na prezentovaných výsledcích ukazuje, že diagnostická metoda, její platnost a velikost chyby měření závisí nejen na metodě, ale také na typu výboje (magnetron vs. dutá katoda), jeho režimu (dc vs. pulzní), typu energetického rozdělení EEDF, hodnotách plovoucího potenciálu a elektrického zapojení diagnostického uspořádání. I přes tyto skutečnosti práce ukazuje velký potenciál sondových měření pro *in-situ* a *in-time* měření reaktivních výbojů např. pomocí FHP nebo *double* FHP.

Moje jediná výhrada, možná subjektivní, souvisí s motivací předložené práce. Autor předložil ucelený text zaměřený na precizní sondovou diagnostiku depozičních výbojů. Nicméně mi v textu chybí detailnější vysvětlení motivace, proč je právě tato diagnostika tak důležitá a jaká je vzájemná souvislost mezi měřenými parametry plazmatu a vlastnostmi vrstev. Práci sice doplňuje kapitola 5.4 věnovaná *ex-situ* diagnostice deponovaných vrstev avšak její přímé propojení s ostatními kapitolami výrazně pokulhává; zvláště pokud toto srovnáváme s ostatním monolitickým textem.

I přes tuto výhradu se nikterak nemění můj názor, že autor předložil po odborné a vědecké stránce mimořádně kvalitní pojednání s originálními a pro technologickou praxi zajímavými výsledky. Jednoznačně prokázal dobrou orientaci a erudici v dané problematice. V předložené disertační práci prokázal schopnost komplexního pohledu na řešenou problematiku, prokázal schopnost samostatné vědecké práce a schopnost výsledky kriticky hodnotit a formulovat odpovídající závěry.

**Z těchto důvodů, bez pochybností či výhrad, jednoznačně doporučuji předloženou práci přijmout k obhajobě a v případě jejího úspěšného složení udělit titul Ph.D.**

**Do diskuse navrhuji několik témat, inspirovaných předloženou prací:**

- a) Výše uvedená výtka se týká chybějící motivaci s ohledem na důležitost *in-situ* a *in-time* diagnostiky v technologických výbojích. Mohl by tomuto tématu věnovat doktorand svůj komentář podpořený krátkou prezentací v rámci diskuse?
- b) Rozsah experimentální činnosti a analýzy výsledků je široký. Mohl by autor specifikovat svůj vlastní přínos a detailněji specifikovat rozsah své činnosti?
- c) Kapitola 2 je věnována popisu experimentálního zařízení a elektrickému zapojení jednotlivých metod. Jaký je podíl autora na vývoji těchto zařízení.
- d) Mohl by autor kriticky diskutovat hlavní rozdíly a výhody mezi single a double FHP?
- e) Jak byla určována chyba měření? Některé grafy jsou důsledně opatřeny chybovými úsečkami, v jiných grafech, a těch je většina, chybové úsečky chybí.
- f) Mohl by autor blíže diskutovat Obr. 3.11 s ohledem na tvar distribuční funkce? Je fitována jedna elektronová teplota, přičemž tvar tělesa distribuční funkce indikuje bi-Maxwellovo rozdělení.