

Oponentský posudek na disertační práci

pana Mgr. Matěje Jana Morávka

„Study of plasma in the mixtures with molecular gas at wide pressure range – Studium doutnavého výboje v kyslíku a jeho směsích za středních tlaků“

Předkládaná disertační práce se zabývá aktuálním tématem studia parametrů nízkoteplotního plazmatu v stejnosměrném doutnavém výboji (DC GD) kyslíku a směsi kyslíku s dusíkem generovaného za středních tlaků (650 Pa - 2000 Pa). To umožňuje realizovat technické a průmyslové procesy založené na aplikaci tohoto typu výboje kyslíku současně s nízkými požadavky na použitý vakuový systém. V tomto širokém rozsahu tlaků však DC GD kyslíku vykazuje neobvyklé chování, Kromě H-formy výboje kyslíku se objevuje i T-forma výboje kyslíku. Obě tyto formy se vzájemně liší optickými emisními spektry a elektrickým polem v kladném sloupci DC GD. Příčiny současného výskytu obou forem výboje v těsné blízkosti v jednom a tom samém výboji a jejich zřetelné oddělení přechodovou oblastí nebyly doposud dostatečně vysvětleny a jsou tudíž cílem komplexního a systematického experimentálního studia v předložené disertační práci. Experimenty byly zaměřeny na studium různých parametrů výboje, jako jsou změny axiálního elektrického pole, koncentrace elektronů a optická emisní spektra s důrazem na přechodovou oblast mezi oběma formami výboje. Studium emisních spekter bylo proto zaměřeno na kvalitativní i kvantitativní analýzu rozdílů v emisních spektrech obou dílčích forem i přechodové oblasti mezi oběma formami. Výsledky uvedené v této disertační práci získal autor během svého působení na Katedře fyziky povrchů a plazmatu Matematicko-fyzikální fakulty UK v Praze.

Vlastnímu textu práce předchází úvodem vyspecifikování hlavních cílů práce, které jsou dále přesně specifikovány v kapitole 1.4.

V úvodní rešeršní části práce autor uvádí stručný a dostatečně výstižný přehled o současném stavu problematiky se zaměřením se na stejnosměrný doutnavý výboj v kyslíku a jeho směsí s dalšími plyny s ohledem na jejich využití v aplikacích jako jsou plazmové leptání, plazmatická oxidace, depozice tenkých vrstev a plazmová sterilizace, či aplikace směsi inertního a molekulárního plynu jako pracovní náplně plyných laserů. V další části věnuje autor pozornost popisu a analýze vlastností H-formy a T-formy výboje kyslíku v závislosti na gradientu axiálního potenciálu plazmatu.

Další, druhá kapitola, je věnována popisu použitých diagnostických metod, tj. metodě dvou sond, optické emisní spektroskopii (měření koncentrace a rotační teploty excitovaných částic plazmatu) a mikrovlnnému rezonančnímu měření koncentrace elektronů pomocí mikrovlnného toroidního rezonátoru.

Následující, třetí kapitola, je věnována popisu experimentálního uspořádání a to jak dvou variant vlastní výbojové trubice, tak vakuového systému a použitých diagnostických metod pro měření parametrů plazmatu. V této části je věnována pozornost metodě dvou sond, která kromě základních parametrů plazmatu jako je koncentrace elektronů umožňuje určit i změny axiálního elektrického pole v plazmatu. Diagnostický systém pro optickou emisní spektroskopii (OES) umožňuje měření parametrů plazmatu nejen ve směru axiální osy výbojky a kolmo k ní, ale pomocí radiálního skeneru i radiální závislost změn výbojem emitovaného záření. Pro měření koncentrace elektronů v kladném sloupci výboje byla použita metoda mikrovlnného toroidního rezonátoru (2 253.5 MHz).

Na tomto místě bych chtěl ocenit přístup autora práce k vypracování těchto částí práce, které jsou napsány velmi přehledně a výstižně.

Těžiště disertační práce je v další, čtvrté kapitole, která je věnována popisu a vyhodnocení provedených experimentů, včetně zhodnocení výsledků a jejich diskuzi. Tato část je přehledně strukturována do kapitol podle typu plyné náplně výbojky (čistý kyslík

nebo směs kyslíku s dusíkem) a každá kapitola je strukturována do podkapitol zahrnujících výsledky získané výše uvedenými diagnostickými metodami.

V první části této kapitoly se autor práce zabývá výsledky získanými ve stejnosměrném doutnavém výboji v čistém kyslíku. Na základě OES měření koncentrací excitovaných částic v axiálním směru byl zmapován hysterezní přechod mezi H- a T-formou výboje pro tlak 650 Pa. To potvrzují i měření rotační teploty (OES) molekulárního kyslíku v závislosti na výbojovém proudu, včetně dominantního výskytu T-formy směrem k vyšším tlakům (až 1000 Pa a vyšší). V oblasti T-formy byla následně provedena série měření koncentrací excitovaných stavů atomárního kyslíku v závislosti na výbojovém proudu. Při měření v kolmém směru na osu výbojové trubice byl u obou forem výboje zřetelný rozdíl mezi optickými emisními spektry, odpovídající zvětšení rotační teploty při přechodu mezi T- a H-formou a obdobné změny byly pozorovány i u koncentrace excitovaných částic atomárního kyslíku. Pro doplňující měření koncentrace elektronů v obou formách výboje a v přechodové oblasti mezi nimi byla použita metoda mikrovlnného toroidního rezonátoru, axiální elektrické pole bylo měřeno pomocí dvojice sond. Pro vyhodnocení vlivu složení stěn výbojky byla provedena i měření OES radiální závislosti změn výbojem emitovaného záření pomocí radiálního skeneru v případě dvou identických výbojových trubic z různých materiálů (Pyrex a křemenné sklo).

V druhé části této kapitoly se autor práce zabývá výsledky získanými ve stejnosměrném doutnavém výboji ve směsi kyslíku s dusíkem. V tomto případě výboj vykazuje zřetelně rozdílnou strukturu a chování obou H- a T-forem už po přidání malého množství dusíku (cca 1 % z celkového tlaku).

V poslední, třetí části této kapitoly autor práce porovnává výsledky získané ve výboji v čistém kyslíku a kyslíku s příměsí dusíku, vzhledem k patrným rozdílům v měření rotační teploty, která dosahuje za jinak stejných podmínek vyšších hodnot ve směsi kyslíku s dusíkem v porovnání s čistým kyslíkem pro tlaky nižší než 2 000 Pa.

Poslední kapitola je věnována stručnému a přehlednému shrnutí dosažených výsledků a závěrů práce.

Seznam použité literatury ve vlastní disertační práci obsahuje 55 odkazů, které jsou v práci bohatě citovány. Součástí této práce je i přehled publikační činnosti autora práce (celkem 7 impaktovaných recenzovaných zahraničních časopisů a 5 příspěvků v konferenčních sbornících) a dále seznam obrázků a přehled použitých zkratk. Jako další přílohu disertační práce obsahuje i 6 k tématu práce relevantních publikací v převážně impaktovaných časopisech.

Práce, která je napsána v anglickém jazyce, je po stránce formální a grafické úpravy na velmi dobré úrovni, v práci se vyskytuje minimum překlepů či drobných nepřesností, jako např. na str. 42, 15 řádek odspodu „A“ namísto „mA“, dále u obr. 4.10 až a 4.12 by bylo pro přehlednost vhodné podobně jako je to např. v obrázcích 4.7 až 4.9 uvést i polohu T- a H-formy výboje vzhledem k vodorovné ose.

Na dané práci velmi oceňuji komplexní a systematické studium dané problematiky.

Celkově lze tedy hodnotit předloženou disertační práci následovně:

- Hlavní výsledky, kterých autor v této práci dosáhl, jsou původní a rozšiřují doposud známé poznatky v oblasti studia parametrů nízkoteplotního plazmatu v stejnosměrném doutnavém výboji kyslíku a směsi kyslíku s dusíkem generovaného za středních tlaků (650 Pa - 2000 Pa).
- Autor provedl rozsáhlou řadu komplexních a systematických měření, diskutoval a analyzoval zvolené metody a dosažené experimentální výsledky.
- K věcnému vědeckému obsahu předkládané práce nemám připomínek a v dané práci jsem nenašel žádné podstatné a závažné nedostatky.
- Byly zvoleny adekvátní metody a disertační práce zcela splnila stanovené cíle.

Z hlediska doplnění mám k práci na závěr následující dotazy:

1) V kapitole 4.1.1.1 autor uvádí výsledky OES měření (ve směru axiální osy výbojové trubice) závislosti rotační teploty molekulárního kyslíku na výbojovém proudu pro různé tlaky ve výbojové trubici (obr. 4.2) a zmiňuje slovně nerovnoměrnou závislost rotační teploty **na tlacích** (650 – 2000 Pa), která v práci již ale není zpracována ve formě grafu. Může autor např. v rámci obhajoby tuto závislost na tlaku prezentovat i graficky pro různé výbojové proudy s komentářem týkajícím se zmiňovaného vlivu přechodu mezi oběma formami H- a T-výboje na tuto závislost.

2) V kapitole 4.1.2.2 autor uvádí výsledky OES měření (kolmo na osu výbojové trubice) závislosti koncentrace excitovaných atomů kyslíku na axiální poloze měřeného místa v přechodové oblasti mezi T- a H-formou výboje v kyslíku. Parametrem každého měření takové závislosti je tlak ve výbojové trubici (viz obr. 4.8 a 4.9). Na rozdíl od případu, kdy byla obdobně měřena závislost rotační teploty molekulárního kyslíku (obr. 4.7), není u obr. 4.8 a 4.9 uveden kromě parametru tlaku kyslíku ve výbojové trubici současně i parametr nastaveného výbojového proudu. Může autor tento parametr upřesnit, případně uvést interval výbojových proudů, ve kterém byl výbojový proud pro stabilizování přechodové oblasti mezi T-H formami výboje nastavován?

3) Může autor vzhledem k axiálním oscilacím plazmatu, které komplikovaly měření koncentrace elektronů metodou mikrovlnného toroidního rezonátoru v axiálním směru (dvojitá rezonance), upřesnit jak široká byla v axiálním směru typická přechodová oblast mezi T- a H-formami výboje za daných podmínek, tj. zda i v tomto případě stejně jako v závěru práce obecně uváděných 20 – 25 mm?

Jako námět pro další výzkum se domnívám, že by bylo zajímavé se pokusit v budoucnu provést v plazmatu směsi kyslíku s dusíkem kromě měření rotační teploty molekulárního kyslíku současně provést i měření rotační teploty molekulárního dusíku.

Autor předloženou disertační práci prokázal schopnost samostatné tvořivé a vědecké práce. Řada jeho publikací evidovaných v databázi WoS, kde ve třech je prvním autorem, dokazuje i jeho schopnost referovat o své práci a prezentovat dosažené výsledky.

Domnívám se proto, že předložená disertační práce pana Mgr. Matěje Jana Morávka „*Study of plasma in the mixtures with molecular gas at wide pressure range – Studium doutnavého výboje v kyslíku a jeho směsích za středních tlaků*“ splňuje požadavky, které jsou na disertační práci kladeny, doporučuji přijmout disertační práci k obhajobě a po úspěšné obhajobě udělení titulu Ph.D.

V Ústí nad Labem, dne 23. 8. 2021

Doc. RNDr. Jaroslav Pavlík, CSc.
Katedra fyziky PŘF UJEP v Ústí nad Labem