

**Oponentský posudek disertační práce Mgr. Jakuba Hromádky  
s názvem**

***2D & 3D computer modelling of low-temperature plasma sheaths  
with a particular focus on their mutual interaction***

**Oponent: doc. Mgr. Pavel Kudrna, Dr.  
Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta**

Disertační práce se zabývá výzkumem stínících vrstev v nízkoteplotním plazmatu, které jsou vytvářeny v blízkosti pevných předmětů vložených do plazmatu, pomocí metod počítačového modelování.

Předložená disertační práce je sepsána anglicky v celkovém rozsahu 138 stran, z toho vlastní text končí na straně 106. Následují seznamy cizí literatury, obrázků, tabulek a zkratk, seznam vlastních publikací rozdělený na 3 v recenzovaných časopisech a 6 ve sbornících konferencí. Připojeno je 5 dodatků o srážkových průřezích, metodě nulové srážky, mechanice srážek, přepočtu souřadnic a odkaz na zdrojové soubory použitých počítačových modelů.

Vlastní text průběžně odkazuje celkem 70 referencí jiných autorů a dále 3 vlastní publikace, z nichž u 2 je Mgr. Hromádka prvním autorem.

Kapitola 1 je stručný přehled teorie stínících vrstev v nízkoteplotním plazmatu a to bez srážek nabitých částic s neutrálními, v elektronegativním plazmatu a plazmatu v přítomnosti srážek. Následuje přehled sondových teorií rozdělený na bezsrážkové a srážkové. Kapitola 2 uvádí teoretické základy počítačového modelování plazmatu a soustřeďuje se na metody použité v práci, tj. částicovou metodu particle in cell a spojitou drift difuzní metodu.

Třetí kapitola popisuje vyvinuté počítačové modely, nejprve 2D PIC/MCC vytvořený již při diplomové práci a poté podrobně 3D PIC/MCC model vyvinutý autorem během disertační práce. Speciálně se věnuje jednak použití knihovny Intel Math Kernel Library k rychlému řešení Poissonovy rovnice a k modelování nabitých předmětů v 3D prostoru, a potom metodě nulové srážky pro řešení srážek nabitých částic s neutrály. Je rozebráno testování PIC/MCC modelu z hlediska stability a přesnosti a v poslední části kapitoly je popsán i použitý 3D spojitý kód, který využívá projekt FEniCS.

Kapitola 4 se věnuje použití vyvinutých modelů na několik konkrétních fyzikálních situací, kterými jsou model vrstvy resp. sondy v bezsrážkovém a srážkovém plazmatu v 1D a ve 3D, vzájemné ovlivnění dvou vrstev resp. sond v elektropozitivním a v elektronegativním plazmatu ve 2D a ve 3D.

Závěr práce je na straně 103, kde do 4 stran se podařilo shrnout obsah i hlavní výsledky práce.

Bylo modelováno nízkoteplotní plazma v argonu o typické koncentraci  $10^{15} \text{ m}^{-3}$  a teplotě elektronů 1 popř. 2 eV. Jednotlivé výsledky modelů autor velmi podrobně rozebírá, srovnává zejména částicový a spojitý model a připojuje i fyzikální vysvětlení, ve kterém ve většině případů uvádí konkrétní fyzikální důvody.

Text je sepsán dobrou angličtinou, s jejíž čtení nečiní potíže. Formálních nedostatků je minimum, překlepů jsem si nevšiml. Vytknout lze systematické vkládání mezery do zkratky e.g., za nešťastný považuji formát referencí stylem jméno plus rok v hranatých závorkách, protože reference tak nejsou číslované. Časté je nevhodné umístění obrázků, které se mnohdy nacházejí velmi daleko za textem, kde se o nich píše, a je třeba k nim listovat. Nešikovné je zobrazení grafů VA charakteristik i pro kladná sondová napětí v semilogaritmickém tvaru. Jedná se o obr. 4.7, 4.15, 4.17, 4.19. Toto je vyřešeno až ve VA charakteristice na obr. 4.32,

doplněním druhého grafu. Podobně je sporná vhodnost logaritmické škály na svislé ose dolního grafu na obr. 4.17.

K práci mám tyto připomínky popřípadě dotazy, ke kterým očekávám od autora při obhajobě reakci:

- Při srovnání 1D modelu ploché vrstvy resp. sondy pomocí 3D kódu jsou patrné skoky v transportních koeficientech určených z modelu pro kladné ionty argonu v obr. 4.5 (b) a (d) na str. 69. Závislosti pro elektrony tyto skoky nevykazují. Čím jsou způsobeny?
- Dotaz mám také k nesouhlasu mezi nízkou iontovou driftovou rychlostí  $u_i$  s bohmovskou rychlostí  $u_B$ . Nabízí se příčina v okrajové podmínce mezi modelovanou oblastí a zdrojem neporušeného plazmatu. V obr. 4.4 (a) je zřejmý nenulový sklon průběhu potenciálu na pravém okraji oblasti, tj. pro  $x=5$  mm. Bylo by možné tuto podmínku nějak opravit?
- Nízká proudová hustota elektronového proudu a z ní určená podhodnocená koncentrace plazmatu v tab. 4.6 má také souvislost s okrajovými podmínkami nebo spíše jde o principiální problém 1D situace, kde celý okraj na jiném potenciálu představuje extrémní narušení plazmatu? Samotný vliv srážek dvacetinásobný rozdíl nevysvětlí, když Debyeova délka je asi 0,2 mm a střední volná dráha elektronu asi 0,4 mm.
- 3D model je v tomto směru mnohem lepší, i když rozdíl 7%, diskutovaný na str. 81, je poněkud optimistický. Vyšel s použitím vztahu 1.2.17, který ale platí pro  $\lambda_e \ll r_p$ , přičemž  $\lambda_e = 0,4$  mm a  $r_p = 0,8$  mm. Správné by bylo použít 1.2.16. Otázka je také definice  $r_p$  pro použitou sondu tvaru kvádru. I zde je sonda ve srovnání s prakticky používanými sondami velmi velká, v milimetrech  $2 \times 2 \times 0,5$  a nejde tak o praktický režim OML. Navíc přítomnost velké sondy více narušuje plazma. Bylo zde omezení dané časem výpočtu a je možné další zrychlení poissonovského řešiče jen vývojem procesorů?
- V obr. 4.17 je patrný nemaxwellovský průběh elektronového proudu. Jak zde byla určována elektronová teplota?

Během práce se podařilo navázat na předchozí diplomovou práci, a vyvinout relativně rychlý 3D PIC/MCC model nízkoteplotního plazmatu. Rychlosti bylo dosaženo využitím knihovny Intel Math Kernel Library pro řešení Poissonovy rovnice. Oceňuji pečlivé testování tohoto modelu pomocí existujících testů. Tento částicový model byl doplněn ještě fluidním modelem na základě drift-difuzního přiblížení plazmatu, který využívá programu FEniCS. Modely byly aplikovány na 1D konfiguraci ploché sondy, 2D model válcové sondy a 3D model ploché sondy konečných rozměrů. 3D model dovolil studovat mnohem reálnější situace a ukázal výsledky mnohem bližší skutečným než model 1D. Velmi pečlivé je hodnocení a srovnávání vypočítaných výsledků autorem včetně jejich vysvětlení. Zajímavé je studium ovlivnění jedné sondy přítomností sondy druhé, menší, které ukázalo, že záporně nabitá sonda ovlivňuje jinou sondu na větší vzdálenost než sonda nabitá kladně. Jsou-li sondy dostatečně blízko sebe, dochází ke snížení proudu a podcenění měřené koncentrace a je rovněž ovlivněna i měřená elektronová teplota.

Nedostatky, které jsem jako oponent musel zmínit, nejsou závažného charakteru. Disertační práce Mgr. Jakuba Hromádky prokazuje schopnost samostatné tvořivé vědecké práce a obsahuje původní i uveřejněné výsledky. Mgr. Hromádka je spoluautorem 3 článků v recenzovaných časopisech. Téma práce je aktuální a rozvoj počítačového modelování by pomohl vyřešit zatím ne zcela vyjasněné otázky týkající se sond.

Práce splňuje požadavky kladené na disertační práci. Práci doporučuji k obhajobě.