

## **LOW TEMPERATURE PLASMA AND NANOPARTICLES: EFFECTS OF GAS FLOW AND SURFACES**

Autor práce: Suren A. Ali-Ogly

Školitel: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.

Katedra makromolekulární fyziky MFF UK v Praze, 2023

### **Struktura a obsah práce**

Doktorská práce, psaná v anglickém jazyce, se zabývá rolí proudu plynu v plynovém agregačním zdroji s magnetronem a jeho vlivem na depozici polymeru PLA a kovových nanočástic. Jak autor v úvodu uvádí, cílem práce je identifikovat procesy v interakcích plazmatu s povrchy, specifikovat jejich řídicí parametry a poté vytvořit matematické modely, simulující pohyb plynu a nanočástic v plynovém agregačním zdroji.

První část práce se zabývá teoretickým popisem interakcí nízkoteplotního plazmatu s povrchy a dalšími jevy, například plazmovou polymerizací či magnetronovým rozprašováním. Autor se zde zmiňuje i o některých záležitostech, týkajících se tvorby modelů v softwaru CFD. Jde např. o způsoby stanovení hraničních podmínek či o korekce rovnic fluidní dynamiky v případě nízkých tlaků. Přehledně je zpracován oddíl, ve kterém jsou popsány síly, které na nanočástice v agregátu působí. Proudění plynu řeší autor vždy nejdříve bez přítomnosti nanočástic. Poté toto stacionární řešení implementuje do modelu, simulujícího časový průběh pohybu nanočástic. Přitom sleduje nejen jejich unášivý pohyb v proudu plynu, ale i jejich záchyt na stěnách komory, vše v závislosti na volitelných parametrech (rychlost proudění a tlak plynu).

Hlavní výsledky autorovy práce jsou soustředěny do závěrečné 4. kapitoly. Nejdříve se zabývá depozicí polymeru PLA, rozprašovaného z terčíku magnetronu, později tento model doplňuje přidáním kovových nanočástic. Na jednom místě zde autor přehledně soustřeďuje popis řady procesů, ke kterým při depozicích dochází, přičemž často využívá experimentální data, která byla získána přímo na pracovišti autora nebo ve spolupracujících institucích. Autor data kvalitativně zdůvodňuje a tato zdůvodnění dává do souvislosti s výsledky simulací proudění nosného plynu v agregační komoře v závislosti na volitelných parametrech aparatury (různě řešené přívody a odvody plynu, rozdílné agregační vzdálenosti, rozdílné tlaky). Pro mě osobně je velice překvapující zjištění, které z modelů průkazně vyplývá, že Brownova difúze má výrazný vliv na únik nanočástic z oblasti magnetronu a na jejich záchyt na stěnách komory. Velká pozornost je věnována procesům a jejich modelování v agregační komoře s tyčovým magnetronem. Tento typ magnetronu by mohl eliminovat některé nevýhody planárního magnetronu.

### **Formální úprava**

Práce má dobrou grafickou úroveň, je psána čtivě a výklad jevů je doprovázen pečlivě provedenými ilustracemi a grafy. Občas se vyskytují překlepy a některé jiné nedostatky. Např. jednotkou teploty je kelvin (K), nikoli stupeň kelvina ( $^{\circ}\text{K}$ , str. 5), fyzikální jednotky se na rozdíl od matematických výrazů píšou stojatým písmem, na konci str. 20 zřejmě vypadla část textu.

Triviální konstatování z prvního odstavce na straně 21, že nelineární N-S rovnice nemají “až do dneška uzavřenou formu analytického řešení”, samozřejmě platí, ale pravděpodobně zde došlo k posunu ve formulaci jiného nevyřešeného problému, totiž že až do dneška není dokázáno, že N-S rovnice mají pro zadané počáteční podmínky řešení a že toto řešení, pokud existuje, je vždy spojitě.

### **Zhodnocení významu práce**

V oblasti depozice tenkých vrstev pomocí magnetronového naprašování probíhá intenzivní výzkum, ale aby mohly být tyto procesy aplikovány v průmyslovém měřítku, je nutný další pokrok. Autorem realizované modely významně přispívají k lepšímu pochopení komplexních a vzájemně provázaných procesů a současně mají potenciál výrazně šetřit čas a náklady, potřebné na vývoj experimentálních aparatur a optimální nastavení jejich provozního režimu. Autor zároveň svými výsledky upozorňuje na možnosti, které této oblasti výzkumu mohou nabídnout metody CFD.

Za jistou slabinu modelů s nanočásticemi považuji, že nezahrnují náboje zachycené na jejich povrchu a nemohou tak ani být uvažovány elektromagnetické síly, které na tyto částice působí. Rovněž není do modelů zahrnut proces růstu a koagulace nanočástic. Jde ovšem o jevy, o kterých je známo velmi málo a jejichž modelování jde za rámec možností softwaru CFD.

Práce má i významný rešeršní přínos. Rozsáhlý přehled různých procesů v magnetronu s agregační komorou a metod jejich detekce je doplněn patřičnými odkazy na speciální literaturu. Odkazy jsou uváděny i u většiny matematických formulí.

Jak dokazují autorovy publikace (jedenáct publikací v recenzovaných časopisech během tří či čtyř let), je členem výzkumného týmu, který se tématy, diskutovanými v disertační práci, intenzivně zabývá. Je proto předpoklad, že v oblasti výzkumu, prezentované v práci, bude pokračovat i nadále.

### **Závěr**

Předložená práce podle mého názoru splňuje všechny požadavky, kladené na disertační práce. Stanovené cíle byly splněny a dosažené výsledky dokládají autorovu způsobilost k vědecké práci. Doporučuji Ing. Surenu Ali-Oglymu udělit titul Ph.D.

### **Otázky**

Má autor zkušenosti i s jiným softwarem CFD než je jím používaný program STAR CCM+? Jsou nějaké důvody, proč tomuto softwaru dal přednost?

Stacionární proudění plynu s válcovou symetrií bylo řešeno v 2D nebo 3D?

Na str. 86 autor modeluje proudění plynu s asymetricky umístěnou pomocnou vývěvou ve střední komoře. Bylo by možné (případně výhodné) umístit výstupní ventily pro vývěvu symetricky, podobně jako tomu je u přívodů plynu?

České Budějovice, 6. 6. 2023

Docent RNDr. Josef Blažek, CSc.