

# Oponentní posudek k bakalářské práci

## Parametrické modelování pulzního vysokovýkonového magnetronového výboje pro depozici vrstev

Tereza Lerchová

Bakalářská práce vypracovaná na katedře fyziky Západočeské univerzity v Plzni se zabývá modelováním vysokovýkonového magnetronového výboje. Hlavním cílem práce bylo seznámit se důkladně s parametrickým modelem vytvořeným J. Vlčkem a K. Burcalovou (KFY ZČU) a doplnit ho o popis chování pracovního plynu a dvakrát ionizovaných kovů.

Bakalářská práce čítá 44 stran a má typickou strukturu rozdělenou do šesti kapitol. Po stručném úvodu autorka ve druhé kapitole shrnuje současný stav problematiky, ve třetí jsou definovány cíle bakalářské práce. Ve čtvrté kapitole je popsán rozšířený model včetně odvození všech rovnic a v páté jsou prezentovány výsledky výpočtu modelu pro dva konkrétní výbojové režimy (nizkovýkonový a vysokovýkonový) při rozprašování mědi. Následuje závěr a přehled literatury.

V přehledu současného stavu autorka popisuje základní principy magnetronového naprašování a vysokovýkonového pulzního naprašování a uvádí přehled metod modelování plazmatu. Zatímco podkapitoly o fluidních, částicových a hybridních modelech jsou obecné, podkapitola „Nestacionární model“ popisuje jeden konkrétní model, který je zmíněn právem, neboť se na něj často odkazuje dále v práci, ale který by šlo spíše zařadit do fluidních modelů, nebo do zvláštní kategorie „Globální modely“. Uvedené členění tak není zcela vhodné (i ostatní typy modelů mohou být nestacionární). Dále jsou v kapitole adekvátně popsány dva parametrické modely, ze kterých autorka vychází, zejména model J. Vlčka a K. Burcalové (publikováno v Plasma Sources Science and Technology, 2010). Celá kapitola je psána stručně, ale jasně a s minimem chyb, občas lze najít nepřesné vyjádření.

Koncepce rozšířeného modelu zůstává stejná jako u Vlčka a Burcalové. Autorka model doplnila o proces ionizace pracovního plynu a o proces ionizace iontů kovu (vznik dvakrát ionizovaných kovů) a zahrнула i popis transportu těchto iontů podobně, jako byly započteny jednoduché ionty. Model tak nově umožňuje využít hodnot výbojového proudu z experimentu k výpočtu složení výbojového plazmatu u terče, konkrétně koncentrace iontů pracovního plynu a neutrálů, jednoduchých iontů a dvojnásobných iontů rozprašeného kovu. Odvození rovnic je korektní, stejně jako výpočty či odhady potřebných materiálových parametrů (rozprašovací výtěžky, koeficienty sekundární emise elektronů, koeficienty relativní ionizace, a další). Na druhou stranu, autorka nedostatečně diskutuje předpoklady modelu, které mohou být zásadní pro interpretaci výsledků. Odvození rovnic vychází ze zákonů zachování ve stacionárním stavu, aniž by to bylo v práci zmíněno. Vypočtené veličiny jsou však prezentovány jako časové závislosti během vysokovýkonového pulzu. Byl tedy zřejmě použit předpoklad, že sledované koncentrace jsou v každém časovém okamžiku kvazistacionární. Očekával bych, že toto bude diskutováno, protože to může vést na odlišné výsledky než při nestacionárním řešení zákonů zachování.

V páté kapitole autorka na šesti obrázcích a v doprovodném textu diskutuje výpočty modelu pro nizkovýkonové a vysokovýkonové pulzní rozprašování mědi. Zjištěné trendy v koncentracích

jednoduchých iontů jsou v souladu s experimenty, což je podpořeno dvěma převzatými obrázky. Zajímavé je zjištění, že dvakrát ionizované atomy mědi jsou i u vysokovýkonového výboje zanedbatelné (koncentrace  $\text{Cu}^{2+}$  300x menší než  $\text{Cu}^+$ ). Tento výsledek však není dále diskutován. To považuji za chybu, zejména s ohledem na fakt, že očekávaný zanedbatelný vliv dvakrát ionizovaných atomů u vysokovýkonového pulzního naprašování byl primární motivací pro rozšíření stávajícího modelu. Bylo by dobré uvést, zda tento výsledek odpovídá skutečnosti (experimentu) a v případě nesouladu uvést možné příčiny. Rovněž by bylo dobré diskutovat vliv některých odhadnutých parametrů (např.  $s$ ,  $k_g$ ,  $k_m$ ,  $k_d$ , apod.).

Závěr práce je velmi stručný a obecný. Mělo by v něm být uvedeno nejen, co bylo uděláno, ale i jakých výsledků bylo dosaženo. Přehled literatury zahrnuje 18 položek. Seznam nemá jednotnou formu, u některých vědeckých článků není uveden název článku, zatímco u jiných ano. Některé názvy časopisů jsou psány zkráceně, jiné plným názvem. U online zdrojů není uvedeno datum, u některých chybí i autor a název. S výjimkou přehledu literatury splňuje bakalářská práce všechny formální požadavky kladené na odborný text. Obrázky mají velmi dobrou úroveň. Vyjadřování je srozumitelné, ojedinělé překlady nebo nepřesné formulace jsou vypsány v příloze tohoto posudku.

Cíle bakalářské práce byly splněny. Bakalářskou práci Terezy Lerchové proto doporučuji k obhajobě. Vzhledem k uvedeným výtkám navrhuji hodnocení **velmi dobře**.

Doplňující otázky:

1. V rovnici (4.12) se vyskytuje čas  $\Delta t$ . Jakou hodnotu má tento parametr při výpočtech? Jak by změna tohoto parametru ovlivnila výsledky?
2. V referenci [16] jsem našel pouze účinný průřez pro ionizaci základního stavu Cu. Jaký účinný průřez byl použit pro ionizaci  $\text{Cu}^+$ ? Uveďte vypočtené koeficienty relativní ionizace  $R_G$  a  $R_D$ , které nejsou v práci uvedeny.
3. Můžete uvést nějaká experimentální data dokumentující množství  $\text{Cu}^{2+}$  iontů ve vysokovýkonovém magnetronovém výboji, na jejichž základě by šlo verifikovat modelem vypočtené koncentrace těchto iontů?

V Klatovech dne 18.8.2017



Ing. Tomáš Kozák, Ph.D.  
oponent bakalářské práce



## Příloha

Níže uvádím nepřesnosti a drobné chyby, které jsem v práci objevil.

- Str. 8, 1. odstavec (od.): Střídavé používání dvou synonym „vrstva“ a „film“. V odborném textu by mělo být striktně používáno jen jedno.
- Str. 8, kapitola 1.1, 2. od.: Nejasný termín „pohyby v plazmatu“.
- Str. 8, kapitola 1.2, 1. od.: Nejasná formulace „atmosféra se začíná chovat plazmaticky“.
- Str. 9, kapitola 1.3, 2. od.: Příliš obecné tvrzení „nanášejí se vrstvičky s elektrickými nebo magnetickými vlastnostmi“.
- Str. 12, kapitola 2.1.2.1: Nevhodná souslednost vět. Druhá věta je důsledkem tvrzení uvedených ve třetí a čtvrté větě.
- Str. 12, kapitola 2.1.2.1: Překlep „... získali *správné* intenzitu bombardování ...“
- Str. 12, kapitola 2.1.2.3: Místo „pokles koncentrace *iontů* pracovního plynu“ má zřejmě být „pokles koncentrace *atomů* pracovního plynu“, vzhledem k předchozí větě.
- Str. 14, kapitola 2.2.1, 2. od.: Místo „výpočtová rychlost“ je lepší použít „výpočetní rychlost“.
- Str. 15, kapitola 2.2.4, 1. od.: Místo „... nestacionární model *plazmatu*“ přesněji „nestacionární model magnetronového výboje“, neboť model (geometrií i fyzikálními procesy) specificky popisuje magnetronový výboj.
- Str. 16, kapitola 2.3.1, 1. od.: překlep „matetriálu“
- Str. 18, pod rovnicí (2.4): Použita synonyma „frakce“ a „zlomek“ pro dvě veličiny, kdy požadovaný význam je stejný.
- Str. 19, kapitola 2.3.2.2, 1. od.: „Depoziční rychlost na jednotku *hustoty energie terče*,  $a_D/S_d$ “ má být správně „Depoziční rychlost na jednotku *hustoty výkonu na terči* ...“
- Str. 20, obr. 5: Lepší „převzato z [12]“, místo „adaptováno z [12]“.
- Str. 22, kapitola 4.1, 1. od.: Tvrzení „Ukázalo se, že jedenkrát ionizovaný kov je opravdu stěžejní pro udržování plazmatu a interakci s ostatními částicemi, ale ne dostačující. Z toho důvodu se začalo uvažovat o vlivu dvakrát ionizovaného kovu a jeho vliv se ukázal nezanedbatelný.“ by mělo být podpořeno citací.
- Str. 22, poslední od.: Místo „... výpočty počtů *části*“ má být „výpočty počtů *částic*“.
- Str. 23, kapitola 4.1.1, 1. od.: Nepřesná formulace „Označení částic je následující“. Šlo by nahradit „Označení *veličin* ...“ nebo „Označení *toků částic* ...“
- Str. 28, kapitola 4.4.1, 2. od.: Nevhodný termín „... se zvyšující se *hrubostí* povrchu“, lépe použít ustálený termín „... *drsností* povrchu“.
- Str. 30, 1. od.: nejsou uvedeny vypočtené hodnoty  $R_G$  a  $R_D$  použité ve výpočtech modelu.
- Str. 36, poslední od.: Nepřesná formulace „Zde je nutné podotknout, že některé ionty se vlivem difuze do stran mohou během letu do vzdálenosti 100 mm od terče *ztratit z objemového plazmatu*.“ Zřejmě má autorka na mysli, že koncentrace iontů (na ose) mezi terčem a substrátem se s rostoucí vzdáleností od terče snižuje následkem difuze iontů ke stěnám komory.
- Str. 41, 1. od.: překlep „terčedosahuje“
- Str. 41, 2. od.: Nepřesná formulace „Pokles stupně ionizace pro argon je důsledkem jednak podstatně vyšší energie nutné k ionizaci atomů argonu (15.76 eV) oproti energii nutné k ionizaci mědi (7.73 eV), jednak i poklesem energie elektronů ve výboji v důsledku četných excitačních a ionizačních srážek s rozprášenými atomy mědi [10, 15].“ Poklesem stupně ionizace pro argon má autorka zřejmě na mysli nižší hodnoty stupně ionizace argonu než mědi. Argumentace nižší energií elektronů ve výboji není, dle mého názoru, v tomto případě adekvátní. Za prvé, autorka nerozlišuje oba režimy, kdy je různé množství mědi ve výboji a tento efekt by tak měl být výraznější pro VVR. Za druhé, teplota elektronů není v modelu počítána, tudíž tento efekt nemůže být ve výpočtech modelu patrný, přestože je experimentálně potvrzený.

