

Oponentský posudek k bakalářské práci „Fenomenologický model pro vysokovýkonovou pulzní reaktivní magnetronovou depozici dielektrických vrstev“ Michala Šuly

Práce je věnována dvěma důležitým otevřeným problémům v oboru magnetronového naprašování a to vysokovýkonovému pulznímu naprašování (HiPIMS, High-Power Impulse Magnetron Sputtering) a reaktivnímu naprašování dielektrických vrstev. Jak vysokovýkonové pulzní naprašování tak i reaktivní naprašování dielektrických vrstev odděleně přináší řadu potíží, které znesnadňují příslušný proces. Ukazuje se ale, že kombinace těchto procesů nemusí vést ke kombinaci jejich potíží, nýbrž se naopak potíže oddělených procesů mohou aspoň částečně vykompenzovat. K tomu je ovšem potřeba kombinovaný proces reaktivní HiPIMS správně řídit, což vyžaduje detailní a zároveň kvalitativní porozumění fyzikálních a chemických dějů, které při něm probíhají. Toto porozumění může poskytnout fenomenologický model procesu, jestliže je dostatečně detailní, aby popsal všechny důležité jevy, a zároveň dostatečně jednoduchý, aby byl srozumitelný. Proto téma práce je vysoce aktuální s velkým potenciálním dopadem na rozvoj magnetronového naprašování.

V první, přehledové části práce autor zasadil problém reaktivního HiPIMS do širšího kontextu magnetronového naprašování. Stručně a jasně popsal vývoj naprašování od jeho počátků v diodovém výboji, přes vynález magnetronu a pulzní magnetronové naprašování až po HiPIMS a reaktivní naprašování. Dále se podrobněji zaměřil na popis obou procesů a zejména jejich modelování: Fenomenologický Christie-Vlček-Burcalová model pro HiPIMS a Bergův model ustálené reaktivní depozice a jeho zobecnění Kubartem a spolupracovníky na dynamický případ. Na konci této části práce autor popsal program SDTrimSP na výpočet rozprašovacích výtěžků pomocí Monte Carlo simulace srážek částic.

V druhé části práce, která tvoří její jádro, autor nejprve zavedl fenomenologický model reaktivního HiPIMS, který vychází z kombinace výše uvedených modelů, ale významně je rozšiřuje, dále popsal řešení modelu pomocí Runge-Kuttova řešiče v prostředí MATLAB a vstupní parametry simulací včetně výstupů z SDTrimSP a nakonec uvedl výsledky modelu a jejich diskusi. Velmi rozumně kromě HiPIMS provedl pro srovnání též výpočty v kontinuálním a nízkovýkonovém pulzním režimu. Výsledky ukazují, že oproti kontinuálnímu a nízkovýkonovému pulznímu režimu dochází v reaktivním HiPIMS k menšímu pokrytí terče dielektrikem, což vede ke zvýšení depoziční rychlosti. V závěru této části a tím i celé práce autor provedl analýzu vlivu různých parametrů na výsledky depozice, což právě vede k pochopení různých jevů účastnících se procesu a umožňuje jeho optimalizaci. Zde bych jen doporučil nenazývat výpočty s různými hodnotami parametrů jako „Experimenty“, aby se předešlo nedorozumění při srovnání výpočtů s experimentálními výsledky.

Celkově autor napsal práci přehledně a jasně (až na občasné nevyhnutelné překlepy; ty, které jsem našel, příkládám na konci) a prokázal, že je schopen v široké oblasti magnetronového naprašování se dostat až k vysoce aktuálnímu kombinovanému problému reaktivního HiPIMS, sformulovat jeho fenomenologický model, numericky jej vyřešit a zkoumat a diskutovat jeho řešení. Mám jen několik doplňujících otázek:

1. Má průběh proudu v pulzu obdélníkový tvar stejně jako průběh napětí?

2. Doby ustálení, vynesené v grafech, jsou doby, jak dlouho fyzicky běží simulace, než se ustálí, nebo to jsou simulované doby?

3. Existuje obrázek obdobný Obr. 12, ale v ustáleném režimu, aby bylo vidět, jaký pak je průběh pokrytí substrátu během periody a jak moc se stupeň pokrytí během periody mění?

Tím splnil cíle bakalářské práce, a proto ji doporučuji k obhajobě a navrhuji známku výborně.

V Plzni 21.8.13

doc. Šimon Kos

Šimon Kos

Nalezené překlepy:

Anotace—Dále se práce zabývá popsáním fenomenologického modelu reaktivního naprašování tenkých vrstev a jeho následnou analýzou.

Str. 3: „pomocí bombardování(m) ionty“
„Magnetron, uspořádaný tak...“ chybí sloveso hlavní věty

Str. 4: „Napařování izolačních vrstev, obzvláště oxidů...“
„plucho“ má být „plochu“
HiPIMS=High power impulse magnetron sputtering
“...maximální výkon během pulzu je alespoň o dva řády vyšší než průměrný výkon.“
„Tato podmínka, kdy energie může přesáhnout i 10^7 W/m².“ Neúplná věta

Str. 5: „...se reaktivnímu napařování dostalo značné pozornosti...“
„odpařování materiálu“
ZrO₂

Str. 6: „Po jejím překročení se na povrchu vrstvy může objevit elektrický náboj.“
„...hystereze. Její vznik...“
Číslo by mělo být 2.1.1

Str. 7: „S_{RG} Je čerpací rychlost...“
S_{RG} v rovnici (2)

Str. 8: „...naprašování, jež má pulzní frekvenci...“
„Průměrná hustota výkonu na terči obvykle převyšuje...“
„I tak ovšem může krátký časový úsek...“

Str. 10: „...dlouhých pulzů s nižšími hustotami výkonu...“
„...částic plynu, které by se mohly potenciálně ionizovat...“
„za předpokladu, že výtěžek...“

Str. 11: „Zde je vidět fyzická limitace...“

Str. 12: „...energetické elektrony...“
„...silné elektrické pole, které urychluje elektrony, a magnetické pole, které usměřňuje elektrony na terč.“

Str. 13: „Jak je ukázáno...“
„...v porovnání s kontinuálním DC módem pro...“
„...k rovnováze mezi odstraňováním a formováním vrstvy...“

Str. 14: „V ustáleném stavu...“
„...tento model rozvinuli Vlček a Burcalová.“

Str. 15: „...zajistit vhodným dynamickým upravováním parametrů...“
„Zároveň je je třeba...“
„Do ke komoře...“

Str. 16: „pluchu“ má být „plochu“
Číslo by mělo být 2.3.1.1 (též další čísla posunutá a vše též správně v obsahu)

Str. 17: „...mezi neutrálními molekulami reaktivního plynu a elementárními atomy terče.“
„...složení přidávaného materiálu...“

Str. 18: (15) je bilanční rovnice pro θ_c , ne pro A_c .
Aby platilo (16), musí být Q_c ve (14) definováno bez $(1-\theta_c)$

Str. 20: veličiny j, f v rovnici (24) by měly být značeny J, F v souladu s předchozími rovnicemi.
V rovnici (24) chybí index u θ a třetí člen by měl být vynásobený J .
Co je k_{RG} v rovnici (25)?

Str. 21: v rovnici (28) chybí třetí člen

Str. 22: čísla mají být 2.4.1 a 2.4.2 (též v obsahu)
„...částic, jež jsou...“

Str. 25: Proč je v posledním členu rovnice (30) druhý příspěvek? Proč je celý ten poslední člen ještě násoben $(1-\theta_s)$?

Str. 26: dvakrát stejné číslo rovnice. Proč se v druhé rovnici (31) dělí proud jenom plochou erozivní zóny?
„Podíl iontů reaktivního plynu z celkového toku kladných iontů na terč...“

Str. 27: co je α bez indexu v rovnici (35)?
Jaký je rozdíl mezi f_{tr} a f_s v rovnici (35)?
Rovnice (36)?

Str. 28: Runge-Kuttova metoda
 $10^6 \text{m}^{-3} \text{cm}^3$ v rovnici (37)
„...tloušťka jedné monovrstvy spočítaná z (38) je...“
„Lze tedy aproximovat...“

Str. 29: dvakrát číslo rovnice (38)

Str. 30: někde v textu by měl být odkaz na tabulku

Str. 31: „Kontinuální režim...“
„...na konci periody neliší od stavu na začátku periody...“

Str. 32: Jak to, že substrát a terč mají stejný poloměr ale různou plochu?
sticking coefficients atomů a molekul mají být naopak.

Str. 33: hodnota B_r pro pulzní režim má být 0.075
Proč pokrytí bulku klesá v kontinuálním režimu pro dostatečně velký tlak reaktivního plynu?...odpověď v textu
Doba ustálení je čas simulace nebo čas výboje?

Str. 34: proč u HiPIMS doba ustálení od určitého tlaku na něm nezávisí, kdežto pro kontinuální a pulzní režim je stále klesající?

Str. 35: V jak asi dobrém souladu jsou výpočty s měřeními?

Str. 37: v popisku obrázků má být $p_{mm}=0.1 \text{Pa}$
co znamená „čistší povrch ze stechiometrické sloučeniny na substrátu“?