

Oponentský posudek k diplomové práci „Reaktivní vysokovýkonová pulzní magnetronová depozice vrstev HfO₂“ Davida Kolenatého

Předkládaná diplomová práce se zabývá aplikací nedávno vyvinuté a v současnosti dále vylepšované metody reaktivní magnetronové depozice s použitím vysokovýkonových pulzních výbojů s řízeným přítokem reaktivního plynu (nebo reaktivních plynů) na oxid hafničitý jako kandidát na izolační bariéru hradla v CMOSFET díky svému velkému zakázanému pásu, velké dielektrické konstantě a dobré kompatibilitě s křemíkem. Jedná se tak o jednu z prvních aplikací této nové metody, a tudíž výsledky jsou důležité jak pro metodu samotnou tak i pro její užití v elektronice.

Práce je rozdělena na tři hlavní části odpovídající třem zásadám pro vypracování práce, přičemž třetí zásada byla v cílech rozdělena do dvou částí 3. a 4. V první části David vychází z obecného úvodu v Kapitole 1, kterým zasazuje magnetronové naprašování do obecného kontextu výroby povrchových vrstev plazmovými technologiemi, a pak rychle a srozumitelně postupuje v Kapitole 2 od popisu magnetronového výboje obecně k jeho pulzní vysokovýkonové variantě a jejím vlastnostem (zpoždění pulzu proudu za pulzem napětí, rozředění plynu a pokles proudu a samorozprašování) a následně k reaktivnímu naprašování a jeho problémům (mikrooblouky, hystereze). První část je zakončena přehledem vlastností oxidu hafničitého, zejména elektrických a vlastností jeho rozhraní s křemíkovým substrátem, které jej činí nejslibnějším členem oxidů skupiny IVB pro izolaci hradla CMOSFET.

Druhá část v Kapitole 4 dává stručný a jasný popis zdroje a hlavních částí depoziční aparatury (samotné komory s magnetronem a substrátem, systému čerpání a napouštění a měřící přístroje tlaku, proudu, napětí a teploty) a principu řízení depozice. Dále jsou popsána zařízení na měření tloušťky vrstev, rentgenové difrakce, komplexního indexu lomu a mikrotvrdosti a modifikovaného Youngova modulu.

Jádro práce je třetí část v Kapitole 5, tj. prezentace výsledků a její diskuze. David zvolil dobrou strategii vyšetřování výbojových charakteristik, depozičních charakteristik a vlastností vrstev na dvou parametrech, tedy délce napěťového pulzu t_1 a střední výkonové hustotě při depozici $\langle S_d \rangle$ a to vždy nejprve uvedením tabulky se všemi hodnotami a pak uvedením grafů s měnícím se pouze jedním z obou parametrů a případně ukázal změnu těchto závislostí se změnou druhého parametru. David zjistil, že při konstantním $\langle S_d \rangle$ a zvětšujícím se t_1 stejně jako naopak při konstantním t_1 a zvětšujícím se $\langle S_d \rangle$ roste depoziční rychlost, spotřeba kyslíku a účinnost spotřeby kyslíku při růstu vrstvy. Tvrdost a index lomu roste a mizí preferenční orientace. Zhruba řečeno zjistil, že vlastnosti výboje i vrstev se zlepšují s růstem každého z těchto dvou parametrů. U každého výsledku ihned provedl diskuzi a vysvětlení, případně poukázal na nejasnosti, které vyžadují další zkoumání. Např. poměr $a_D/\langle S_d \rangle$ zde překvapivě roste s rostoucím $\langle S_d \rangle$, zatímco pro nereaktivní naprašování tento poměr klesá, a David správně píše, že tento rozdíl poukazuje na dosud neznámé vlastnosti reaktivního vysokovýkonového pulzního naprašování. David si též všimá důsledků svých výsledků pro aplikace, např. možnosti řídit strukturu vrstev těmito dvěma parametry.

V závěru Kapitoly 5 David provedl srovnání vlastnoručně změřené depoziční rychlosti oxidu hafničitého a dříve změřené depoziční rychlosti oxidu zirkoničitého. Velkým přínosem je

podle mého názoru srovnání změřených hodnot s kombinovaným modelovým výpočtem nejprve rozprašovacích výtěžků obou kovů a následně transportu rozprášených atomů k substrátu. Shoda je lepší než v rámci faktoru 2, ale zároveň nesoulad ukazuje význam nezapočtených (případně dokonce neznámých) faktorů reaktivního vysokovýkonového naprašování, které nebyly zahrnuty v modelu.

Celkově se mi práce dobře četla a mnohé jsem se z ní sám dozvěděl nebo jsem si ujasnil. Je to díky tomu, že David má zjevně materiál dobře zažitý a promyšlený. V práci jsou občasné nevyhnutelné překlepy a drobné nepřesnosti, jejichž seznamy přikládám. Nenašel jsem žádný zásadní problém. Mám jen několik otázek, které беру spíše jako podněty do diskuse než jako kritiku:

1. Na straně 33 píšeš, že hodnotu průtoku reaktivního plynu X nastaví obsluha. Ve vývojovém diagramu na téže straně je toto nastavení před smyčkou. Můžeš rozvést, jakým způsobem se tato hodnota nastaví. Konkrétně, jakým způsobem jsi dostal hodnoty X prezentované na Obr. 5.1, 5.2, 5.17 a 5.18?
2. Předpokládám, že kromě maxim na Obr. 5.1-5.2 (a 5.17-5.18) jsou taky posunuta minima parciálního tlaku a proudu na terč. V tom případě Obr. 5.5-5.8 neukazují nejvíce rozdílné průběhy proudů a napětí. Proč neukážeš největší rozptyl? Totéž se týká Tab. 5.1 a Tab. 5.3. Též Obr. 5.20-5.21 (tam jsou jen maxima).
3. Na straně 51-52 argumentuješ, že s rostoucí délkou napět'ového pulzu t_1 roste hustota vrstev. Můžeš to vysvětlit, když s rostoucí t_1 při konstantní střední hodnotě výkonové hustoty při depozici $\langle S_d \rangle$ se snižuje napětí v pulzu U_{da} , výkonová hustota v pulzu S_{da} a tím i stupeň ionizace rozprášených částic?
4. V Tab. 5.2 a 5.4 a v Obr. 5.13 a 5.26 ukazuješ vysoké hodnoty tvrdosti. Jak víš, že nejsou způsobeny vnitřním pnutím?

V práci David ukázal, že splnil všechny vytýčené cíle, a proto práci doporučuji k obhajobě a navrhuji známku výborně.

V Plzni, 17.6.14

Šimon Kos



Seznam překlepů:

- Str. 7: „ m_e je hmotnost iontu“
Str. 9: „atomů terče, jenž hrají významnou roli“
Str. 10: „samorozpračovaniho“
Str. 10: „začnou se objevovat další fyzikální, netechnické omezení“
Str. 10: „k náhlému runaway““
Str. 11: „v magnetickém presheathu, které má“
Str. 12: „elektronů a iontu“
Str. 19: „3,9 nm“
Str. 19: „... vysokou elektrickou pevností... a relativně vysokou šířku...“
Str. 21: „respektrive“, též str. 22
Str. 21: „častečnému“
Str. 22: „V případě Weibullova rozdělení... je parametru umístění...“
Str. 22: „Parametru tvaru HBD byl zjištěn...“
Str. 22: „byo“
Str. 23: „tlusou“
Str. 24: „požívají“
Str. 26: „oxidů nitridů“
Str. 28: „v řadu desítek Pa“
Str. 28: „depoziční komoru (2)“
Str. 29: „*napouštění plynů*“
Str. 29: „vakuové komoře (2)“
Str. 29: „součásti komory“
Str. 31: „*těsnění*“
Str. 31: „*napojení*“
Str. 31: „*měřici*“ 2×
Str. 32: „substráty, jež byly“
Str. 32: „před upevněním držák substrátu“
Str. 35: „jak jí známe“
Str. 35: „komplexní složka“
Str. 36: „Naměřena data“
Str. 37: „může byt výsledek ovlivněn“
Str. 39: „ $d=100$ mm“ 2×
Str. 39: „ $S_{\text{terče}} = 78,54\text{cm}^2$ “
Str. 39: „průměrný průtok kyslíku“ (chybí: a průměrný proud na terč) „přes celou depozici“
Str. 41: „měnil a plynule“
Str. 55: „spolu s rostoucí délkou pulzu“
Str. 61: „půběhů“
Str. 61: „odprašujě“
Str. 63: „depoziční rychlosti $\langle \Phi_{\text{ox}} \rangle$ “
Str. 69: „*poměru depoziční rychlosti průměrného průtoku kyslíku*“
Str. 70: „stheathu“
Str. 71: „rozprašených atomu, které opustí terč z plochy 1 cm^2 za 1s a vypočítá se ze vztahu“
(též chybí čárka za „1s“)

Seznam drobných nepřesností:

Str. 4: $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift i pro homogenní pole. Navíc to není další drift. Je to ten drift, který je popsán na str. 3 a ukázán na Obr. 2.2.

Str. 5: výboj byl zapálen změnou napětí? Co je maximální odchylka mezi oběma časovými průběhy? (ne změnou; odchylka má být chyba)

Str. 12: úbytek napětí na nevodivé vrstvě představuje velkou část přivedeného napětí pro vysokou nebo nízkou dielektrickou konstantu?

Str. 18: iontová polarizace důležitější pro nízké frekvence, takže naopak GHz jsou dostatečně nízké? Charakteristické frekvence fononů a tím i iontů jsou THz.

Str. 19: proč ne pořadí Ti-Zr-Hf jako ve sloupci periodické tabulky?

Str. 19: pro kterou fázi je $\epsilon_r = 22 - 25$? Pro c-, t-, m- fáze na str. 20 jsou jiné hodnoty.

Str. 21: co znamená, že valenční vazba obsahuje tři vazby? Nebo myslíš pásy? Tj. bands a ne bonds?

Str. 22: co je x ve Weibullově rozdělení? Je to čas, kdy dojde k průrazu? Co má za následek zvětšení nebo zmenšení beta? Proč není diskutováno alfa? Chceme β co největší? Pak $\beta = 8$ pro SiO_2 je lepší než $\beta < 4$ pro HfO_2 ?

Str. 23: depozice samotného Hf snížilo tloušťku křemičité vrstvy?

Str. 23: Hf radikály ionizují SiO_2 ? Nebo ho redukují?

Str. 30: celkový tlak je 2 Pa, kdežto v abstraktu se píše, že to je jen tlak pracovního plynu. Na str. 39 se navíc celkový tlak označuje p_{Ar} .

Str. 33: proč je ve vývojovém diagramu na začátku $H_{nastavená} > H_{aktuální}$? Jak poznám, jestli bylo dosaženo maximální depoziční rychlosti? (Jak poznám, jestli je oxid stechiometrický, vím)

Str. 33: jaký je rozdíl mezi průtokem reaktivního plynu $\Phi_{reakt.}$ a hodnotou průtoku reaktivního plynu X ? Jestli X je hodnota veličiny $\Phi_{reakt.}$, pak nemělo by být ve vývojovém diagramu napsáno Nastav X místo Nastav průtok kyslíku $\Phi_{reakt.}$?

Str. 33: mohou být vztahy (4.1) a (4.2) i naopak?

Str. 33: „...s obecně odlišným časovým intervalem mezi dvěma po sobě následujícími pulzy.“ Odlišným od čeho?

Str. 34: „...zakryt proužkem ze stejného materiálu...“ Ze stejného jako co?

Str. 34: když chyba obou metod měření tloušťky byla méně než 1%, tak proč elipsometrie zpřesnila profilometr?

Str. 35: polarizace světla se vyjadřuje poměrem amplitud a fázovým posunem. Má být změna polarizace.

Str. 38: proč je ve výčtu depozičních charakteristik nejdřív průměrný průtok reaktivního plynu a pak teprve samotný průtok?

Str. 40: proč t_1 klesá, kdežto $\langle S_d \rangle$ roste? Protože s klesajícím t_1 roste S_{da} ?

Str. 40: tloušťka vrstvy může být jakákoliv při dané délce pulzu a střední hodnotě výkonové hustoty, protože vždycky můžu přizpůsobit délku depozice? Totéž se týká str. 56.

Str. 43: s klesající délkou pulzu t_1 rychleji roste a pomaleji klesá parciální tlak kyslíku. Vidím jistě, že pomaleji klesá, ale přijde mi, že kvůli větším rozestupům i pomaleji roste. Totéž se týká str. 58 a Obr. 5.17-5.18. Navíc tam je pro nižší $\langle S_d \rangle$ taky nižší S_{da} , takže ten argument by šel obráceně?

Str. 48: rovnice (5.4) by naopak dala pokles depoziční rychlosti s rostoucí délkou pulzu?

Str. 53: orientace označené písmeny 1-10: jsou to roviny Ta nebo oxidu a pak v které fázi?

Str. 60: proč i jiné délky pulsů než 200 μs ?

Str. 66: nejvyšší hodnota E^* je pro jiný výkon než nejvyšší hodnota H .

Str. 69: zpětně odražených Ar iontů. Myslel jsem, že při odrazu dojde k neutralizaci. Na str. 72 píšeš o odražených argonových atomech.

Str. 70: oprava S. Mahieu et al.—započtení efektu povrchové vazební energie. Jak mohou být částice rozprášené bez tohoto efektu?

Str. 74, 77: Co je relativní atomové číslo?