

V Praze dne 10.3 2023

## Oponentský posudek disertační práce

- Autor práce:** Mgr. Tomáš Bárta
- Název práce:** Vysoce účinné termochromické povlaky  $ZrO_2/V_{1-x}WxO_2/ZrO_2$  s nízkou přechodovou teplotou připravené na skle pomocí reaktivního pulzního plazmatu
- Studijní obor:** Fyzika plazmatu a tenkých vrstev
- Školící pracoviště:** Katedra fyziky, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni
- Školitel:** prof. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc.
- Oponent:** doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.

Téma práce je zaměřeno na využití unikátních vlastností termochromických povlaků pro vývoj tzv. chytrých oken. Termochromické povlaky mají schopnost měnit svou propustnost pro sluneční záření v závislosti na okolní teplotě. Při dosažení přechodové teploty, povrch povlaku začne odrážet část infračervené složky slunečního záření, která potom nepřispívá k zahřívání interiéru budov. V současné době je to velmi aktuální problém pro oblasti, kde vlivem globálního oteplování dochází k neudržitelnému nárůstu energií potřebných pro ochlazování interiéru budov. Termochromický děj je sice dlouhodobě známý, ale zatím se ho nepodařilo využít pro výše uvedené aplikace. Hlavní překážkou pro jeho širší uplatnění je poměrně vysoká přechodová teplota u vybraných povlaků a jejich komplikované nanesení na větší plochy.

V případě úspěšného vyřešení těchto omezení, by to byl jednoznačný posun k reálným aplikacím.

V úvodní části práce autor vysvětluje pojem chytrá okna a jak mohou přispět ke snížení energetické náročnosti provozu budov. Zaměřuje se na využití termochromických povlaků, především oxidu  $\text{VO}_2$ . Teoretická část práce je zaměřena na detailní popis a vysvětlení termochromického jevu. Vysvětluje, proč byl vybrán oxid  $\text{VO}_2$  a jaké jsou možnosti snížení přechodové teploty u těchto oxidů. Podrobně se zabývá metodami přípravy povlaků, kde se zaměřuje na metodu magnetronového naprašování. Kromě standardně používaného DC nebo DC pulzního magnetronového naprašování detailně popisuje velmi perspektivní vysokovýkonové pulzní magnetronové naprašování známé pod zkratkou HiPIMS, které je pro přípravu těchto oxidických povlaků nejvhodnější. Naproti tomu část věnovaná základnímu materiálu, na který jsou povlaky nanášeny by si zasloužila více rozepsat. Neobsahuje ani základní charakteristiky jako jsou chemické složení nebo mechanické vlastnosti. Autor sice uvádí, že popis konkrétního flexibilního skla je chráněn smlouvou o mlčenlivosti, ale mohl provést obecnou rešerši z veřejně dostupných zdrojů. Celkově je kapitola současného stavu poznání přehledná a je zpracována velmi dobře i z pohledu edukativního.

V práci byly formulovány následující cíle: ověření funkčnosti již existujícího třívrstvého optického modelu  $\text{ZrO}_2/\text{V}_{1-x}\text{W}_x\text{O}_2/\text{ZrO}_2$  na plochem skle, snížení přechodové teploty na  $25\text{ }^\circ\text{C}$  pomocí dopujícího prvku, kterým byl wolfram a v poslední fázi přenesení této technologie do velkoplošného povlakovacího zařízení, ve kterém bude povlak nanášen na flexibilní sklo. Obtížnost takového přenosu je dána především aplikací nové pulzní technologie HiPIMS. V experimentální části práce je z dosažených výsledků vidět, že optický systém deponovaný v laboratorním i velkoplošném povlakovacím zařízení vykazuje velmi podobné hodnoty transmitance. Hlavní cíl práce byl tímto splněn. Úspěšný přenos této technologie do velkoplošného zařízení byl dokonce vybrán v roce 2022 příslušným orgánem (Innovation Radar team) Evropské komise mezi nejvýznamnější vynikající inovace (Highlighting excellent innovations). Přestože je samotný postup přenosu v práci velmi dobře popsán a experimentálně

doložen, bylo by pro úplnost vhodné také doplnit metodu předúpravy skleněných substrátů před depozicí, ověřit adhezi a otěruvzdornost optického systému nebo doložit homogenitu pokrytí v celé povlakované ploše, popřípadě definovat kritické parametry, které mohou mít vliv na stabilitu procesu během velkoplošného povlakování.

Struktura samotné práce je logická, použité zdroje a převzaté obrázky jsou řádně citovány. V práci autor jednoznačně vymezuje vlastní přínosy a přínosy svých kolegů, od kterých převzal například model optického systému, řízení procesu nebo jednotlivé analýzy povlaků. Je potřeba také vyzdvihnout nadstandartní publikační činnost autora. V práci jsou citovány celkem čtyři články (1x autor, 3x spoluautor) a je uveden také seznam 12ti konferencí s příspěvkem věnované této problematice, kterých se autor účastnil (přednášky nebo postery).

Celkově je práce velmi dobře strukturovaná. Experimentální činnost je na velmi vysoké úrovni a získané výsledky jsou pro danou aplikaci unikátní. Proto doporučuji předloženou disertační práci k obhajobě.

**Otázky:**

1. Je navržený optický systém dostatečně otěruvzdorný, aby vydržel působení vnějších podmínek?
2. Jaká je plánována předúprava povrchu skla před povlakováním?
3. Jakou nehomogenitu tloušťky lze předpokládat pro větší povlakované plochy a jaký vliv na optické vlastnosti budou mít případné defekty a nečistoty v povlaku?

Ladislav Cvrček

Ústav materiálového inženýrství

Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze



**Vysoce účinné termochromické povlaky  $ZrO_2/V_{1-x}W_xO_2/ZrO_2$  s nízkou přechodovou teplotou připravené na skle pomocí reaktivního pulzního plazmatu**

---

Autor: Mgr. Tomáš Bárta  
Školící pracoviště: Katedra fyziky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni  
Školitel: prof. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc.  
Oponent: RNDr. Zdeněk Weiss, CSc.

Předložená disertační práce se týká termochromických povlaků na bázi oxidu vanadičitého dopovaného wolframem, s dvojicí antireflexních vrstev oxidu zirkoničitého, na klasickém a ultratenkém flexibilním skle. Tyto povlaky byly studovány s cílem vyvinout materiál pro tzv. 'chytrá okna', která při nízké teplotě velmi dobře propouštějí celé spektrum dopadajícího slunečního záření, zatímco při vyšších teplotách významnou část jeho infračervené složky odrážejí. Toto téma je velmi aktuální, slibující významný příspěvek k úsporám energie: ve slunečném počasí v zimě se místnosti s okny obrácenými na jih ohřívají mj. skleníkovým efektem a v létě se při vyšších teplotách zmíněný skleníkový efekt omezí, čímž se ušetří za klimatizaci. Zároveň jde o problematiku velmi zajímavou i z fyzikálního hlediska: spojují se tady netriviální úlohy z oboru fyziky pevných látek (podstata fázové přeměny mezi monoklinickou a tetragonální fází  $VO_2$ ), fyzikální optiky (antireflexní vrstvy), fyziky plazmatu a povrchů (magnetronové naprašování) a velmi široké škály diagnostických metod, z nichž každá je založena na nějakém specifickém fyzikálním principu, jehož zvládnutí a pochopení je nezbytné pro správnou interpretaci měření a k získání potřebné informace o studovaných systémech.

Práce je velmi dobře strukturovaná. V částech 1 a 2 je podán srozumitelný přehled této problematiky a je popsán současný stav, na základě důkladné literární rešerše. V části 4 je popsána použitá metoda přípravy těchto povlaků pulsním magnetronovým naprašováním (HiPIMS) z kovového terče, v argonu s řízeným pulsním připouštěním kyslíku, a dále všechny metody použité pro charakterizaci získaných povlaků. Část 5 obsahuje popis dosažených výsledků, s podrobnostmi o podmínkách depozice a o vlastnostech a parametrech získaných povlaků, včetně přenosu metodiky depozice z laboratorní aparatury na velké poloprůmyslové zařízení umožňující depozici zmíněných povlaků na ultratenké flexibilní sklo ve velkých plochách.

Celkově tato práce působí velmi impozantně a dosti převyšuje standard disertací, se kterými jsem se setkal na jiných pracovištích. Popisovaný výzkum se týká aktuální problematiky a byl veden s použitím nejlepších v současné době používaných experimentálních metod a s využitím originálních znalostí a postupů vyvinutých na KFY FAV ZČU. Velmi výrazně se v této práci odráží týmová spolupráce a také úroveň použitého vybavení. Nebylo by v silách jednotlivce obsáhnout všechny použité metody a postupy do potřebné hloubky, stejně tak experimentální aparatury a analytické přístroje pocházejí od

renomovaných výrobců a rolí disertanta je použit je pro daný účel s maximálním porozuměním, případně nakonfigurovat a optimalizovat příslušnou aparaturu. Podobná dělba práce v rámci týmu existuje i v oblasti metod, postupů, software apod. Z předložené disertace je vidět, že se autor těchto rolí zhostil úspěšně, což dokumentuje i přehled jeho publikací: 4 články v impaktovaných časopisech, přičemž v jednom článku je disertant uveden jako první autor, a 12 příspěvků na významných mezinárodních konferencích. Nicméně celkovému vyznění disertace by prospělo, kdyby se autor explicitně přihlásil k těm experimentům/nápadům/závěrům, které učinil přímo on, a uvedl, za které části této studie jsou zodpovědní spíše jeho kolegové, podobně jako se to vyžaduje u článků s více autory v kvalitních časopisech ('*CRediT authorship contribution statement*', apod.).

Při obhajobě navrhuji, aby autor zodpověděl některý z následujících dotazů:

kapitola 2. - Současný stav poznání:

- (a) Bylo by možné nějak velmi zhruba odhadnout charakteristickou energii interakce 3d elektronů u iontu  $V^{4+}$  v oxidu vanadičitém ve smyslu Mottovy teorie zmíněné v disertaci (str. 11 dole) a porovnat ji s pozorovanou teplotou (kT) fázového přechodu mezi oběma fázemi  $VO_2$ ?
- (b) Dalo by se nějak vysvětlit, proč dochází k reflexi infračerveného záření od rutilové struktury  $VO_2$  a nikoli od monoklinické, případně proč jsou reflektovány zejména fotony s energií hv menší než  $\approx 1.2$  eV (tj.  $\lambda > \approx 1000$  nm, obr. 2.5) ?

kapitola 4.1. - Příprava  $VO_2$ :

Jak byla při depozici dopovaných vrstev řízena jejich stechiometrie (poměr W/V)? Změnou střídy pulzního napájení magnetronu s wolframovým terčem? Nebo se použily nějaké už dříve vyzkoušené parametry depozice, za kterých se dosahuje optimální stechiometrie (obr. 2.6, 5.6.)?

kapitola 4.2.3. - Měření prvkového složení:

Bylo by možné okomentovat interpretaci změřených spekter WDS z hlediska určení stechiometrie vrstev, rozebrat faktory určující nejistoty výsledných hodnot a provést kvalifikovaný odhad těchto nejistot? Pochází údaje o stechiometrii uvedené na str. 39, 42 a 49 z těchto měření?

Práce je psána srozumitelně a dobrou češtinou. Autor osvědčil svoji schopnost pracovat v dobře sešnaném týmu a odvést přitom práci, která vedla k důležitým původním výsledkům. Vytyčené cíle disertace jsou zajímavé a důležité a jejich dosažení bylo přesvědčivě dokumentováno.

Práce splňuje kritéria běžně kladená na doktorskou disertaci a doporučuji ji k obhajobě.

V Praze dne 24. února 2023

RNDr. Zdeněk Weiss, CSc.