



KATEDRA FYZIKY FEL ČVUT, TECHNICKÁ 2

166 27 PRAHA 6

Tel. 224 352 333

Fax: 233 337 031

E-mail: pekarek@fel.cvut.cz

**Oponentský posudek doktorské dizertační práce:**

**"Low-temperature deposition of high-performance thermochromic VO<sub>2</sub>-based coatings using pulsed reactive magnetron sputtering"**

**Dizertant:** Ing. David Kolenatý

**Školitel:** Prof. RNDr. Jaroslav Vlček, CSc.

**Školící pracoviště:** Katedra fyziky, Fakulta aplikovaných věd, ZČU Plzeň

#### **Hodnocení významu dizertační práce pro obor.**

V souvislosti se skutečností, že v průmyslových zemích stráví běžná populace většinu svého života v budovách, automobilech, či jiných uzavřených prostorech, je kvalita života v těchto objektech předmětem intenzivního studia. Nejedná se pouze o hledisko spotřeby energie, ale například i o vliv vnějších jevů na podmínky a hodnoty různých fyzikálních veličin uvnitř budov. Sem například patří nejen vliv stěn i oken na průchod akustických signálů ale zejména i na přestup tepla. Právě otázkám spojeným s přípravou a charakterizací termochromických povlaků na bázi VO<sub>2</sub>, právě pro „chytrá“ okna, je dizertace věnována. Jedná se tedy o problematiku vyžadující znalosti z oboru materiálového inženýrství v kombinaci s fyzikou plazmatu, které jsou použité pro tvorbu těchto vrstev. V souvislosti s možným použitím, se tedy jedná o tematiku s výrazným aplikačním potenciálem.

Práce vznikala od roku 2014 na katedře fyziky FAV Západočeské univerzity v Plzni a Evropského centra excelence. Výzkum byl prováděn v rámci řešení dvou projektů SGS a jednoho projektu GA ČR.

#### **Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle.**

Dizertační práce je věnována problematice přípravy a charakterizace termochromických povlaků na bázi VO<sub>2</sub>, například pro tzv. „chytrá“ okna. Vrstvy byly připravovány pulzním reaktivním magnetronovým naprašováním při teplotách nižších než 330 °C.

Práce je rozdělena do 5 kapitol. První kapitola se týká uvedení do studované problematiky. Tato kapitola, která je zpracována velmi důkladně, vtáhne čtenáře do problematiky a přináší celou řadu zajímavých informací. Z této kapitoly je zřejmé, že se autor v dané oblasti velmi dobře orientuje. Ve druhé kapitole jsou definovány cíle dizertace. Nejobsáhlejší třetí kapitola popisuje dosažené výsledky. Kapitola je rozdělena do sedmi částí ve formě šesti článků publikovaných v prestižních mezinárodních časopisech a jednoho konceptu článku připravovaného pro publikaci. Ve čtvrté kapitole jsou stručně rekapitulovány dosažené výsledky.

Z porovnání cílů dizertace a obdržených výsledků je zřejmé, že cíle dizertace byly jednoznačně splněny.

#### **Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele dizertační práce.**

Výsledky dizertační práce vznikaly v součinnosti autora spolu s dalšími pracovníky z katedry. Za velké pozitivum dizertace proto považují, že autor jednoznačně specifikoval svoje vlastní výsledky i svůj podíl na společných publikacích. Je nutno podtrhnout, že se autor nepodílel pouze na provádění experimentů spojených s depozicí VO<sub>2</sub> a VO<sub>2</sub>-W vrstev, zúčastnil se i návrhu „heating cell for the measurement of

spectroscopic transmittance at elevated temperatures“, analyzoval a interpretoval naměřená data a aktivně se podílel i na psaní článků.

Práce je na vynikající úrovni, výsledky publikované v prestižních časopisech, prošly důkladným oponentním řízením. Z tohoto důvodu k práci nemám zásadní připomínky. Přesto však by mne zajímal názor dizertanta na otázku, jak se mění, případně mění-li se vlastnosti VO<sub>2</sub> a VO<sub>2</sub>-W vrstev v závislosti na koncentraci aktivních částic, například přízemního ozonu, ve vzduchu. Tato koncentrace se mění a vzhledem k tomu, že ozon je silné oxidační činidlo ovlivňuje vlastnosti některých materiálů. Tato závislost se například projevuje u TiO<sub>2</sub>.

V části 3 úvodní kapitoly mi není zcela jasný význam termínu „hydrostatic“ ve větě: “The equilibrium solid phases of the V–O system at 0.1 MPa hydrostatic pressure are single-valence phases V, VO, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, VO<sub>2</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and the mixed valence phases known as the Magneli and Wadsley series, which can be written as V<sub>n</sub>O<sub>2n-1</sub> (n = 4 – 9) and V<sub>n</sub>O<sub>2n+1</sub> (n = 3, 4, 6), respectively“. Termín „hydrostatic“ je používán u tekutin, nejedná se tedy spíše o „atmospheric“ pressure?

Dizertaci Ing. Kolenatého hodnotím jako vysoce kvalitní. Je zřejmé, že její autor získal řadu nových unikátních výsledků týkajících se pochopení procesů, ke kterým dochází při tvorbě termochromických povlaků na bázi VO<sub>2</sub>.

#### **Vyjádření k systematičnosti, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni dizertační práce.**

Dizertační práce má 98 stran. Kvalitní rešerše stavu problematiky, zahrnující práce od roku 1937 do současnosti a čítající 38 položek, poskytne úvodní informace nejen o historii problematiky ale i o současném stavu.

Práce, napsaná v angličtině, je zpracována profesionálně a přehledně a svědčí o schopnosti autora vysvětlit pozorované jevy a jasně formulovat dosažené závěry. Po formální jazykové stránce mám však určitou připomínku. Veškerý text dizertace by měl být na vysoké úrovni. Tuto podmínku splňuje celá dizertace s výjimkou části: Resumé česky. Při čtení této části čtenář nabývá dojmu, že byl použit strojový překlad (např. „i“ a „í“, termíny mechanicky přepsané z angličtiny „durability“ atd.)

#### **Vyjádření k publikacím dizertanta.**

Výsledky dizertační práce jsou obsaženy v šesti člancích publikovaných v prestižních mezinárodních časopisech a v konceptu jednoho článku připravovaného pro publikaci. Jedná se o časopisy s vysokým impaktním faktorem - Applied Surface Science (impakt faktor 4.439); J. Phys. D: Appl. Phys. (impakt faktor 2.373, 2 publikace); Thin Solid Films (impakt faktor 1.939), a Journal of Alloys and Compounds (impakt faktor 3.15). Rád bych uvedl, že Ing. Kolenatý je v seznamu autorů článků na předních místech a v jednom případě (Journal of Alloys and Compounds) je autorem hlavním. Kromě těchto prací je Ing. Kolenatý také na prvním místě mezi autory připravované publikace “High-performance thermochromic VO<sub>2</sub>-based coatings prepared on glass by a low-temperature pulsed reactive magnetron sputter deposition“. Ing. Kolenatý svoje výsledky také prezentoval ve formě přednášek i posterů na 15 konferencích jak v Evropě, tak i v USA. Lze tedy konstatovat, že publikační činnost dizertanta, zejména vzhledem ke skutečnosti že se jedná o publikace za čtyři roky, má vynikající úroveň.

#### **Vyjádření zda je dizertační práce doporučena k obhajobě.**

Předložená dizertační práce, obsahující publikace v prestižních vědeckých časopisech, představuje vyvážený a kompaktní celek poskytující dokonalý popis unikátních výsledků spojených s přípravou a charakterizací termochromických povlaků na bázi VO<sub>2</sub>. Jsem přesvědčen, že dizertace jednoznačně prokázala schopnost Ing. Kolenatého k samostatné tvořivé práci a proto ji doporučuji k obhajobě.

Praha 30. 11. 2018

Prof. Ing. Stanislav Pekárek, CSc.  
Katedra fyziky FEL, ČVUT Praha



Posudek na disertační práci: *Ing. David Kolenatý, Nízkoteplotní depozice vysoce funkčních termochromických povlaků na bázi VO<sub>2</sub> použitím pulzního reaktivního magnetronového naprašování.*

Disertační práce popisuje rozsáhlou experimentální studii nízkoteplotní přípravy tenkých vrstev VO<sub>2</sub> s termochromickými vlastnostmi. Práce je rozdělena do pěti celků a obsahuje přehledně zpracovaný úvod, kde se čtenář seznámí s teoretickými poznatky o těchto termochromických materiálech a s fyzikálními procesy, které v těchto systémech probíhají. Následuje druhá část, kde jsou definovány cíle disertační práce. Třetí část obsahuje popis výsledků, což jsou preprinty publikací, které dizertant publikoval jako hlavní autor nebo spoluautor o problematice VO<sub>2</sub> termochromických vrstev. Čtvrtá část obsahuje souhrn všech výsledků disertační práce s odkazem na vytyčené cíle. Následuje pátá část, kde jsou uvedeny další publikační výstupy a prezentace na konferencích.

V první fázi disertace popisuje depozice VO<sub>2</sub> vrstev na Si substrát pomocí reaktivního HiPIMS magnetronu s pulzním řízením reaktivního plynu. Právě tato originální metodika kontroly reaktivního plynu v pulzním HiPIMS magnetronu umožnila depozici správné krystalické fáze VO<sub>2</sub> s žádanými termochromickými vlastnostmi. Obrovskou výhodou studovaného postupu je možnost přípravy těchto typů vrstev za nízké teploty a bez přídavného předpětí substrátu tedy za podmínek velmi vhodných pro průmyslovou produkci. V další části práce byly tyto funkční vrstvy nanášeny na sklo opět za výhodných podmínek pro praxi a s vynikajícími vlastnostmi. Je zařazena i studie, kde jsou objasněny fyzikální procesy v reaktivním pulzním magnetronovém plazmatu, které korelují s vlastnostmi deponované vrstvy a jsou klíčové pro dosažení optimální fáze termochromického VO<sub>2</sub>. Jedná se především o stanovení iontových toků jednotlivých rozprášených a reaktivních ionizovaných komponent na substrát a určení jejich energetických distribučních funkcí. Tuto studii velmi oceňuji a považuji ji za klíčovou, pokud bude nutné podmínky úspěšných depozic zreprodukovat na velkých průmyslových magnetronech s HiPIMS pracovním režimem. Velmi užitečná je i následující část, kde byly funkční VO<sub>2</sub> vrstvy dopovány prvky wolframu pomocí paralelního bipolárního pulzního rozprašování W terče. Tím je značně snížena teplota fázového přechodu VO<sub>2</sub> materiálu do metalického modu a snížena transmise pro infračervené pásmo.

Lze konstatovat, že práce je velmi rozsáhlá a obsahuje velké množství vědecky kvalitních výsledků a tedy rozsahem plně vyhovuje nárokům na disertační práci. Osobně se domnívám, že se jedná o velký posun použití reaktivního HiPIMS s pulzní regulací reaktivního

plynu pro přípravu funkčních tenkých vrstev VO<sub>2</sub>. Disertace je obsahově i formálně zpracována na velmi vysoké úrovni. Dizertant plně prokázal, že je schopen samostatné vědecké práce a je schopen produkovat odborné publikace s velkým vědeckým potenciálem. Disertační práce je jako celek cenná studie, která popisuje uceleně přípravu funkčních termochromických vrstev v různých konfiguracích a naznačuje další směr výzkumu přípravy těchto materiálů. V práci je také jasně deklarováno, které části experimentální studie prováděl dizertant zcela samostatně a co byl jeho hlavní přínos. Z výše uvedených důvodů doporučuji práci k obhajobě a udělení titulu Ph.D. K práci bych měl následující komentáře a dotazy:

- 1) Na straně 58 kap 2.2 není zřejmě uvedena správně délka pulzu. Je uvedeno 50 s, ale má být zřejmě 50  $\mu$ s. Obdobná formální chyba se na stránce ještě opakuje pro délku pulzu pulzního buzení katody W terče. Jedná se evidentně o tiskovou chybu.
- 2) Diskutujte prosím depoziční rychlost vrstev VO<sub>2</sub> a její význam pro potenciální průmyslovou aplikaci tedy depoziční rychlost versus aplikovaný střední výkon a porovnejte tyto vlastnosti s již známými klasickými depozičními metodami těchto materiálů.
- 3) V práci je hodně studován vliv kladných iontů kyslíku na vlastnosti deponovaného materiálu. Myslíte, že na kvalitu deponovaných vrstev mají vliv i negativní ionty kyslíku ?
- 4) Existují nějaké úspěšné konkurenční metody depozic termochromických VO<sub>2</sub> vrstev, které by připadaly v úvahu pro praktické použití ?

V Praze dne: 3. 12. 2018



Mgr. Zdeněk Hubička, Ph.D.