

Oponentní posudek disertační práce

**Investigation of Functional Thin Films Prepared
by Ionized Jet Deposition Method**

Autor práce: ing. Jakub Skočdopole

Školitel: doc. Ing. Ladislav Kalvoda, CSc.

Katedra inženýrství pevných látek FJFI ČVUT

Struktura a obsah práce

Doktorská práce, se zabývá přípravou tenkých vrstev vysokoteplotních supravodičů metodou Ionized Jet Deposition (IJD). Cílem práce bylo pomocí experimentálního zkoumání vlivu zvolených parametrů depozice IJD na vlastnosti připravených tenkých vrstev najít vztah mezi depozičními parametry metody a vlastnostmi deponované vrstvy a rozšířit tak soubor obecných teoretických znalostí potřebných pro použití IJD. IJD je relativně nová metoda přípravy tenkých vrstev využívající pulzní elektronový svazek k ablaci terče zdrojového materiálu. Jak autor uvádí, výhodou metody je její flexibilita s možností modifikovat proces nanášení pomocí širokého spektra depozičních parametrů. Tato flexibilita však na druhé straně přináší zvýšené nároky na optimalizaci procesu, který je velmi komplexní a zahrnující řadu vzájemně provázaných parametrů, a proto vyžaduje hlubší porozumění fyzikálních jevů účastnících se depozice.

Po krátkém všeobecném úvodu do problematiky a představení současných směrů a cílů výzkumu a vývoje vysokoteplotních supravodičů následuje teoretická část, která poskytuje úvod do problematiky metody IJD, popisuje fyzikální základy procesu, uspořádání experimentálního zařízení a základní charakteristiky vysokoteplotních supravodičů používaných v práci. V této kapitole jsou též popsány experimentální metody použité pro charakterizaci zdrojových terčů a deponovaných tenkých vrstev. Třetí kapitola obsahuje popis provedených experimentů a vlastní výsledky doktoranda včetně diskuse dosažených výsledků. Je zaměřena především na závislost rychlosti růstu tenkých vrstev, jejich povrchové morfologie a objemové struktury, chemické kompozice a elektrické vodivosti, na depozičních parametrech, kterými byly urychlovací napětí, teplota a umístění substrátu v depoziční komoře a hustota a chemická kompozice zdrojového terče. V poslední, čtvrté kapitole jsou shrnuty závěry uvedených experimentů a navržen další směr optimalizace metody pro získání supravodivých pásek pro praktické využití. Na závěr jsou uvedeny seznamy zkratk, obrázků, tabulek a citované literatury.

Formální úprava

Práce je psaná v anglickém jazyce přehledným způsobem, má dobrou grafickou úroveň, je psána čtivě a výklad jevů je doprovázen pečlivě provedenými ilustracemi a grafy. Občas se vyskytují překlepy typu „**impact** journal“, „presented **on** international conferences“ nebo „will **consists**“ a některé jiné nedostatky. U obrázků skenovací elektronové mikroskopie bývá zvykem uvádět měřítko přímo do obrázku, zde je jen součástí výpisu parametrů uvedených pod obrázkem. U profilu na obrázku 3.3 chybí barevné měřítko. Formulace „Infinite electrical resistance was measured ...“ není fyzikálně přesná. Vhodnější je uvést, že odpor byl větší než nějaká limitní hodnota.

Práce je spíše kratšího rozsahu, včetně 24 obrázků v teoretickém úvodu a 26 obrázků a 8 tabulek s původními experimentálními výsledky, závěrečných seznamů a citací zabírá 85 stran, ale s poměrně značným volným prostorem.

Zhodnocení významu práce

Aktuální potřeba technologie přípravy tenkých vrstev supravodivých materiálů je dána obecně velmi špatnými mechanickými vlastnostmi samotných vysokoteplotních supravodičů, které je nutno proto kombinovat s nosiči, které poskytují potřebnou flexibilitu. Výzkum, jehož výsledky jsou v práci uvedeny, byl prováděn se záměrem vývoje depozice tenkých vrstev metodou IJD pro přípravu pásek vysokoteplotních supravodičů, která by mohla najít přímé uplatnění při průmyslovém využití v ČR, kde je technologie v tomto směru na velmi vysoké úrovni i v rámci mezinárodního srovnání.

V oblasti depozice tenkých vrstev pomocí IJD probíhá intenzivní výzkum, ale aby mohly být tyto procesy aplikovány v průmyslovém měřítku, je nutný další pokrok. V práci sice nebylo dosaženo úplné optimalizace parametrů procesu, která by umožnila přípravu pásek se supravodivými vlastnostmi, autor ale významně přispěl k optimalizaci vzájemně provázaných procesů potřebné pro nastavení provozního režimu aparatury. Výsledky jsou užitečné pro další výzkum v oboru.

Otázky

1. Při vakuové depozici se dosahuje homogenity deponovaných vrstev rotací držáku substrátu. Je podobný přístup možný i při metodě IJD?
2. Obrázek 2.7 ukazuje absorbovaný výkon elektronového paprsku v závislosti na hloubce pod povrchem terče. Osa x je označena jako normovaná hloubka. V textu není napsáno, na jakou hodnotu se hloubka normuje.
3. V práci je použit pro měření tloušťky konfokální optický mikroskop. Měřené tloušťky jsou v řádu pod 200 nm. Takového rozlišení je však možné dosáhnout pouze speciálními metodami, zahrnujícími například osvětlovací systém se strukturovaným světlem. Bližší informace o použité metodě by byla užitečná. Jaké je limitní axiální a laterální rozlišení této mikroskopie? Byla tato měření ověřena nějakou jinou metodou, např. AFM nebo mechanickým kontaktním profilometrem? Metoda AFM je v experimentálních metodách popsána, ale ve výsledcích není o měření pomocí AFM zmínka.
4. Jaký je výškový profil nehomogenit na povrchu vrstvy? Jsou zobrazeny kapky s plochou v řádu mikrometrů, ale konfokálním profilometrem s rozlišením v řádu nanometrů nejsou na povrchu tyto kapky vidět.
5. Podle obr. 3.22 byla pro měření odporu použita lineární čtyřbodová metoda. V zobrazeném uspořádání by však vlastnosti vrstvy mohly být ovlivněny použitou stříbrnou pastou. Nebylo by vhodnější uspořádání elektrod na členěném obvodu, jak bývá u vodivých anorganických materiálů obvyklé?
6. Co bylo supravodivým materiálem v referenční pásce vyrobené německou společností Theva Dünnschichttechnik GmbH použité pro experiment s Meissnerovým jevem?
7. Penetrační hloubka elektronového svazku klesá nepřímo úměrně s rostoucí hustotou materiálu terče. Množství ablatovaného materiálu při dané hloubce penetrace s hustotou ale přímo úměrně roste. Tyto efekty by se tedy měly vzájemně kompenzovat, ale z obrázku

3.3 je patrné, že tloušťka deponované vrstvy při srovnatelných časech deposice s rostoucí hustotou materiálu terče klesá. Bylo by tento rozpor možno vysvětlit?

8. Je zajímavé, že chemické složení zdrojového terče je po depozici ve většině případů blíže teoretickému složení, než před depozicí (viz obr. 3.11). Přitom lze předpokládat, že terč byl připraven ve správném požadovaném stochiometrickém složení. Bylo by možno tento rozpor vysvětlit?

Závěr

I přes některé nedostatky zmíněné výše je předložená práce kvalitní a obsahuje řadu hodnotných výsledků, které byly též úspěšně publikovány ve třech impaktovaných mezinárodních odborných časopisech. Stanovené cíle byly splněny a dosažené výsledky dokládají autorovu způsobilost k vědecké práci. Schopnost samostatné vědecké práce dokládají i další tři práce s podobnou problematikou uvedené ve WoS, přičemž ve čtyřech z celkem šesti publikovaných prací je doktorand uveden jako první autor. Předložená práce podle mého názoru splňuje všechny požadavky, kladené na disertační práce.

Doporučuji proto Ing. Skočdopolemu udělit titul Ph.D.

V Praze, 31. 7. 2023

RNDr. Jiří Pfleger, CSc.