

Oponentský posudek k disertaci „Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu“ Tomáše Martínka

Perkolace je pozoruhodný jev tím, že ve své ideální nejjednodušší podobě je snadno sformulovatelný jakožto vzájemně nekorelované náhodné umístění částic v mřížce a při tom vykazuje celou hloubku kritického chování v okolí fázového přechodu druhého druhu s anomálními dimensemi odlišnými od Landauových rozměrových exponentů středního pole zejména ve 2d, kde se vedle renormalizační grupy dají použít techniky konformní teorie pole. Zároveň perkolace našla rozmanité aplikace—epidemie, těžba nafty, gelování polymerů a též vedení elektrického proudu v neuspořádaných vodičích, což je předmět disertační práce Tomáše Martínka. Neuspořádaným vodičem v této práci je ultratenká vrstva wolframu nanosená na různé nevodivé substráty magnetronovým naprašováním atom po atomu a tím pádem blízko ideální nejjednodušší podobě problému perkolace navíc v koncepčně nejlépe pochopitelném 2d případě. Zároveň má studium perkolace v ultratenkých vodivých vrstvách význam pro jejich aplikace, např. pro sensory, takže práce v sobě kombinuje studii koncepčního problému a jeho aplikace a je tudíž hodnotným příspěvkem k obojímu.

K určení perkolačního prahu použil Tomáš Martínek různé metody—terahertzovou pump-probe spektroskopii, měření stejnosměrného odporu a optické vlastnosti: transmitance, absorpance a luminiscence. Zjistil, že práh perkolace se neprojeví v THz spektroskopii. Všechny optické vlastnosti vykazaly změnu pro tloušťku vrstvy blízko nad 1,5nm. Perkolační práh v této oblasti potvrdila měření elektrické vodivosti, která navíc umožnila určení kritického exponentu vodivosti. Tento exponent vyšel blíže známé hodnotě při omezení fitování na oblast bližší přechodu v souladu s obecným principem, že kritické mocinné chování je asymptotické k bodu fázového přechodu. Čili Tomáš Martínek splnil cíl práce určit perkolační práh ultratenkých vrstev a kritický exponent vodivosti, čímž potvrdil vhodnost použitých metod.

Po formální stránce je práce přehledně členěna do kapitol. Po stručném a výstižném úvodu shrnujícím základní pojmy a koncepce studované v práci a po cílech práce následují tři přehledové kapitoly věnované použitým diagnostickým technikám, magnetronovému naprašování a teorii perkolace. Poté následuje kapitola s vlastními výsledky práce a po ní diskuse výsledků a jejich přínosu pro vědu a praxi. V práci jsem našel jen občasné drobné gramatické chyby nebo překlepy, které spolu s drobnými náměty na možná zpřesnění přikládám v příloze. Celkově bych Tomášovi Martínkovi doporučil používání činného rodu při popisu vlastních výsledků, aby byl jasnější jeho vlastní příspěvek, i když v tomhle případě je jasný z kontextu a vlastně už z názvu práce. Na konci práce je seznam publikací Tomáše Martínka na třech stránkách, který považuju za dostatečný.

Práce splnila požadavky na doktorskou disertaci, a proto ji doporučuju k obhajobě, pro kterou mám tři otázky:

1. Na str. 48 píšete: „Ze všech řešení (celkem 1890) byly vyfiltrovány smysluplné výsledky...“ Co to znamená?
2. Na str. 54 píšete: „Tyto lasery byly zvoleny z důvodu, že jejich frekvence se s největší pravděpodobností nachází pod plazmovou frekvencí deponovaných vrstev...“ Můžete tuhle plazmovou frekvenci odhadnout?
3. Nakonec mám několik námětů do diskuse širšího kontextu práce, který jsem stručně popsal v úvodním odstavci, a prosím o komentáře aspoň k některým z nich: Jak by se měření kritické tloušťky a zejména exponentu dalo zpřesnit? Tím by se vidělo, jestli případné dlouhodobé interakce (elektrické, magnetické, deformace) změni exponent a tím třídu univerzality? Co další exponenty? Co finite size scaling pro dostatečně malé vzorky? Konformní invariance na zakřiveném povrchu? Fraktální dimenze z mikroskopie a multifraktální dimenze v rozdělení proudů ve vzorku?

V Plzni, 30.7. 2019

Šimon Kos

Šimon Kos

Seznam drobných gramatických chyb, překlepů a námětů na možná zpřesnění

Abstract

- „Main goal of this work is to determine percolation threshold“ možná bych dal člen

Str. 5

- „Nanotechnologie jsou jedním z nejperspektivnějších vědních oborů s možným dopadem na všechny části lidského bytí a vědění. Jednou z jejich částí jsou tenké vrstvy.“ Možná lepší slovo než částí?
- „Tyto vrstvy jsou zajímavou oblastí fyziky,“ jsou samotné vrstvy oblastí fyziky?
- „homogenní pevný materiál obsažený mezi dvěma paralelními rovinami“ jak se dostanou ty dvě roviny?
- „Kde rozměr ve směru z je tloušťka vrstvy.“ Součást předchozí věty?
- „kvůli velikosti struktur, která se může blížit i atomárnímu rozlišení.“ Atomární velikosti? Též dále.
- „dá použít pouze omezené množství metod“ tvoří metody množství?
- „čištěného křemíku s 200 nm termickou vrstvou oxidu křemičitého“ co je termická vrstva?

Str. 6

- „Určení perkolačního prahu je jedním ze základních parametrů při vytváření ultratenkých vrstev“ parametrem je perkolační práh nebo jeho určení?

- „určení perkolačního prahu“ má být určení

Str. 8

- „Dále mohou působit síly adhezni, vazebné, třecí, deformační, kapilární, případně i elektrostatické a magnetické.“ Společný původ těchto sil?

Str. 9

- „pouze tehdy, kdy je nosník dál od vzorku získáme výhodu obou metod“ chybí čárka?

Str. 10

- „Pro přeorientování krystalků je vzorek prudce zchlazen k zachování orientace těchto dipólů.“ Po přeorientování?

Str. 13

- „která používá soustavu elektromagnetických prvků, jenž slouží k usměrňování toku elektronů emitovaných ze zdroje.“ Jež?

Str. 14

- „K vyražení dojde pouze za předpokladu, že je předaná energie větší, než je energie kritická pro danou vrstvu.“ Hladinu?

Str. 15

- „Rozdíl energií dvou hladin, mezi kterými se přeskok odehrál,“ energií?

- „a také jedinečné hodnoty energií při všech možných povolených přechodech mezi hladinami.“ Rozdílů energií při přechodech?

Str. 16

- „Metody koherentní detekce využívající například nelineární média nebo fotoelektricky vodivé antény.“ Využívají?

Str. 17

- „pokud se zde nacházejí fotoelektricky nabitě částice“ co je fotoelektricky nabitá částice?

Str. 18

- „Luminiscence nízkodimenzionálních struktur patří k jednomu z nejméně zkoumaných fenoménů.“ Fenoménů?

Str. 20

- „Dále je zde popsán Thorntonův růstový model, který se nejčastěji vztahuje na naprašování.“ Lepší sloveso než vztahuje?

- „kladné ionty bombardují terč a elektrony dopadají na uzemněnou kostru pracovní komory.“ Ionty taky dopadají na uzemněnou kostru, když potenciál plazmatu je kladný vůči zemi?

- „a tím vytváří stabilnější plazmat“ plazma?

Str. 21

- „V rámci vlastní práce byla zvolena metoda radiofrekvenčního magnetronového naprašování wolframových vrstev, jelikož má tento kov vysokou teplotu tání a tato metoda byla k dispozici.“ Má RF nějaké výhody oproti DC pro vodivý terč?

- „Tato struktura je vytvořena nízkou difúzí a malou pohyblivostí absorbovaných atomů povrchem substrátu.“ Adsorbovaných?

- „Jelikož vlastní depozice probíhala při pokojové teplotě substrátu a teplota tání wolframu je přibližně 3683 K, tak tato zóna odpovídá depozici vrstev vytvořených v rámci této práce.“ Mohly by výsledky měření být jiné v jiné zóně?

Str. 22

- „Dopadající tok atomů musí být nejprve tepelně přizpůsoben se substrátem.“ Možná lepší formulace?

Str. 24

- „ ΔG_v je Gibbsova volná energie pevné fáze vztažená na jednotku objemu“ rozdíl Gibbsových energií? Také na další stránce, kde to asi není potřeba opakovat.

Str. 25

- ve vztahu pro ΔG^* nemá být třetí mocnina u γ místo u π ?

- „Právě perkolační teorie hrála jednu z nejvýznamnějších rolí v současném porozumění těchto systémů“ systémů?

Str. 25

- „Broadbente a Hammersley představili perkolaci v roce 1957, která popisovala tok hypotetických částic tekutiny skrze náhodné prostředí.“ Možná jasnější formulace v téhle větě a v dalším vysvětlování pojmu perkolace.

Str. 27

- „Přenos elektrického náboje může být realizován pomocí tunelovacího, skokového nebo jiného přenosového mechanismu vysokého elektrického pole.“ Proč má být elektrické pole vysoké?
Str. 28
- „Pro dvourozměrné systémy je kritický exponent t roven μ .“ Jenom různé označené téže veličiny, nebo je to netriviální výrok? Navíc dále se písmenem t označuje čas a tím pádem jiná veličina?
Str. 28
- „Při rozložení měřících sond do čtverce“ co to znamená?
• na obr. 25 je ještě navíc exponent s .
Str. 29
- „První testovací vzorek měl naměřenou průměrnou tloušťku 62,7 nm a druhý testovací vzorek 64,9 nm. Takto byly vytvořeny vrstvy o nominální tloušťce 0,3 nm až 3 nm wolframu s krokem 0,3 nm.“ Jak se z 62,7 a 64,9 nm dostane 0,3 až 3nm?
• „Byly vybrány různá místa“ vybrána? Těž dál v textu
Str. 33
- bylo by možná užitečné v obr. 35 a dalších použít různé barvy, nejen různé odstíny modré barvy?
Str. 34
- „Imaginární část dielektrické konstanty ϵ' pro vrstvy na Si“ asi mají být dvě čárky?
Str. 36
- „zajímavé změny na frekvencích 1,71573 THz a 1,72177 THz u reálné části dielektrické konstanty“ frekvence jsou měřené s takovou přesností? Odkud se berou tyhle všechny features?
Str. 37
- hodnoty v tabulce jsou stokrát větší než vycházejí podle vzorce?
Str. 38
- „Z výše uvedeného vyplývá“ uvedeného?
Str. 40
- obr. 45 a dál: proč silná závislost na napětí?
Str. 46
- „Horní hranici představuje měřitelnost“ hranici?
• „nejtenší bezpečně změřitelná vrstva měla nominální tloušťkou“ tloušťku?
Str. 52
- „To stejné platí i pro výsledky,“ totéž?
Str. 54
- „větší, než byla odpovídající tloušťka u perkolačního prahu se luminescence neprojevíla vůbec“ chybí čárka?

Posudek

disertační práce p. Tomáše Martínka

“Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu”

Předložená práce se zabývá problematikou určení perkolačního limitu velmi tenkých kovových vrstev. Téma je z oblasti základního výzkumu a je aktuální. Student využil několika vrstev připravených nereaktivním magnetronovým naprašováním o různé nominální tloušťce a testoval různé metody analýzy povrchů k určení vhodné metodiky pro stanovení perkolačního limitu.

Předložená práce obsahuje úvod do řešené problematiky, výsledky jednotlivých analýz, velmi stručnou diskusi a závěr. Cílem práce byl vývoj diagnostických metod pro určení prahu perkolace, v samotné práci však není prezentován vývoj diagnostických metod, ale použití již existujících metod a analýza jejich použitelnosti. Jejich kombinací byl stanoven perkolační limit pro jedny konkrétní depoziční podmínky. Za velmi hodnotnou považuji kapitolu 6.7. Úkol zadané práce byl splněn, ale dle mého názoru minimalisticky. Rozsah v práci popsanych experimentů a získaná metodika by dle mého názoru odpovídala velmi kvalitní diplomové práci, od kvalitní doktorské práce, kdy se student věnoval několik let studiu jednoho konkrétního problému je třeba očekávat více. Je škoda, že po nalezení vhodné metodiky nebyla tato metodika použita na důkladnější studium procesů růstu tenkých vrstev. Dle mého názoru by bylo velmi zajímavé a originální stanovit např. závislost perkolačního limitu na teplotě vzorky při depozici, případně na použitém předpětí – takovéto výsledky by byly publikovatelné i v kvalitním mezinárodním časopise.

Ze seznamu publikací je patrné, že kromě řešení tématu své práce student spolupracoval i na řešení témat jiných. Výsledky práce byly prezentovány na tuzemských i mezinárodních konferencích a v časopisech v žebříčku ležících pod mediánem oboru. Práce je sepsána srozumitelně, spisovně, obrázky jsou však nízké kvality a některé i nečitelné (např 47 vpravo).

Dotazy, ke kterým by se doktorand mohl vyjádřit při obhajobě:

- Při své práci jste používal několik typů podložek pod vrstvy – Si, Si s oxidem a slídu. Lze předpokládat, že na těchto substrátech vrstva vždy roste stejným způsobem?
- Strana 17: píšete, že vlnová délka excitace je OBVYKLE menší než fotoluminiscence. Můžete uvést příklad, kdy to neplatí.
- Strana 21: Thorntonův diagram má dvě osy, v textu diskutujete jen osu teploty. Proč se struktura vrstvy mění s osou tlaku?
- Strana 22: píšete „to se odehraje během několika vibračních period“. Můžete konkretizovat o jakých vibracích píšete.
- Strana 29: píšete 2725 otáček/minutu, není to překlep, takto rychlá rotace?
- Strana 33: píšete „tyto rozdíly mohou být přisuzovány rozdílným umístěním substrátu v komoře“ Proč nebylo vždy foceno stejné místo vzorky? Jaká je třeba uniformita naprašování pro výrobu XRD zrcadel, což je aplikace, o které píšete?
- Strana 36: Jak přesně určujete frekvenci THz vln? Má zápis 1.71573 THz smysl?

Závěr:

Na závěr je možné konstatovat, že autor ve své práci prokázal schopnost tvořivým způsobem přispět k získávání nových poznatků v oblasti materiálového výzkumu. Předložená práce splňuje kritéria kladená na disertační práci. Proto navrhuji, aby po úspěšné obhajobě byla p. Tomášovi Martínkovi udělena hodnost Philosophiae Doctor Ph.D.

v Brně 6.8. 2019


.....

prof. Mgr. Petr Vašina, Ph.D.

Ústav fyzikální elektroniky, Masarykova univerzita

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.

děkan Fakulty Aplikované Informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně
Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín

V Praze dne 26.07.2019

Oponentský posudek dizertace Ing. Tomáše Martínka „Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu“

Dizertační práce Ing. Tomáše Martínka „Diagnostické metody pro určení prahu perkolace ultratenkých vrstev wolframu“ je věnována zejména tématu přípravy a charakterizace ultratenkých kovových vrstev. Tyto vrstvy byly vyrobeny pomocí radiofrekvenčního magnetronového naprašování. Dále byly studovány pomocí mikroskopických, elektrických a optických technik, THz spektroskopie s cílem určení perkolačního prahu. Určení perkolačního prahu ultratenkých vrstev (včetně monoatomárních vrstev s dvourozměrným uspořádáním atomů) je jeden ze základních úkolů při jejich vytváření a pro následné aplikace. Cíl této práce vznikl na základě spolupráce mezi pracovníky Ústavu přístrojové techniky AV a pracovníky Ústavu elektroniky a měření Fakulty aplikované informatiky při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

Kapitola 1 je krátkým, ale výstižným úvodem s popisem “State of the Art” v oblasti tenkých a ultratenkých vrstev, jejich depozice a charakterizačních metod s odkazy na literaturu vybranou z rozsáhlého množství publikovaných prací. Na ten úvod navazuje kapitola 2, kde jsou popsány cíle disertační práce. Hlavním cílem práce je určení perkolačního prahu u ultratenkých vrstev wolframu.

Třetí kapitola je věnována podrobnému přehledu diagnostických nástrojů použitých autorem k charakterizaci vzorků: mikroskopie atomárních sil (AFM), skenovací mikrovlnná mikroskopie, skenovací elektronová mikroskopie, terahertzová spektroskopie v časové doméně a luminiscenční spektroskopie. Kapitola popisuje konstrukci jednotlivých aparatur a možné měřicí módy.

Kapitola 4 je věnována popisu vytváření studovaných vrstev: je rozebírána metoda RF magnetronového naprašování, jsou znázorněny mechanismy růstu tenkých vrstev a jednotlivých klastrů. A právě z klastrů se skládají neuspořádané systémy, které popisuje perkolační teorie, které je věnována kapitola 5.

V kapitole 6 dizertant shrnuje výsledky svých experimentů, které provedl s cílem zjištění perkolačního prahu wolframových vrstev. Kapitola 7 je věnována diskuzi a sumarizaci naměřených výsledků. Pak následuje kapitola 8, ve které je rozebírán přínos této práce pro vědu a praxi, a poslední kapitolou 9 je závěr.

Z textu je zřejmé, že autor dosáhl vlastních výsledků v širokém záběru použitých technik, věnoval se modernímu tématu a osvědčil schopnost koncentrované výzkumné práce.

Nemám však stejně jasný pocit, že autor dokázal výsledky dobře promyslet a zhodnotit. V textu se na více místech vyskytují zřetelné nejasnosti. Např. výsledky měření topografie pomocí

AFM z mého hlediska nejsou dostatečně zpracované. Vzhledem tomu, že byly použity opravdu hladké substráty (RMS roughness křemíkového waferu je pouze $\sim 0,1$ nm), je na obrázcích 31, 32 a 33 vidět, jak se jednotlivé oddělené klastry wolframu postupně spojují. Další příklad: výsledky z THz spektroskopie jsou jen pečlivě popsány, nikoliv interpretované. Až na straně 54 v kapitole 7, která je věnována právě diskuzi dosažených výsledků, je krátká zmínka o tom, že tato metoda se ukázala jako nevhodná. Stejně tomu tak je i v případě prezentace výsledků měření pomocí EDS (str. 37-38): po jejím popisu následuje závěr, že „tato metoda je z principu nepoužitelná pro takto tenké vrstvy“.

Naopak výsledky měření elektrických a optických vlastností jsou zpracované velmi dobře a je z nich jasně vidět, kde se nachází perkolační práh, a výsledné hodnoty jsou si velmi podobné.

Přes uvedené výhrady je zřejmé, že autor provedl velké množství výzkumných prací. Oceňuji také, že porovnal své výsledky s výsledky z obdobných studií (celkem s 6).

Po formální i jazykové stránce je práce velmi dobrá (je napsaná srozumitelně, obrázky jsou přehledné a dobře popsány) a splňuje všechny požadavky kladené na dizertační práce. Jedinou připomínku mám k seznamu vlastních publikací autora, kde nejsou vyznačeny publikace v mezinárodních impaktovaných časopisech.

Podle mého názoru tedy dizertant splnil věcné zadání práce.

Práci tedy doporučuji přijmout k obhajobě a po úspěšné obhajobě doporučuji udělení akademického titulu Ph.D.

Do obecné rozpravy navrhuji následující dotazy:

- 1) Na str. 33 autor zmiňuje, že rozdílné umístění substrátu v napařovací komoře vede k patrným rozdílům struktury výsledných vrstev. Jak moc se mohou lišit takové vzorky a proč byl vybrán přírůstek wolframové vrstvy ve studované sérii vzorků jako 0,3 nm? Bylo by možné tenhle přírůstek zmenšit do 0,1 nm v oblasti blízko perkolačního prahu?
- 2) Měření elektrických vlastností ukazuje, že zkoumané wolframové vrstvy mají relativně malý povrchový odpor. Zajímalo by mne, zda byla také autorem zvažována možnost nanesení horního bočního kontaktu na okraj studované wolframové vrstvy pro měření lokálních proudů pomocí metody vodivostního AFM pro lepší zobrazení propojených a odizolovaných klastrů?

Mgr. Alexej Vetuško, Ph.D.