

Posudek oponenta disertační práce

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: Ústav mikroelektroniky
Student(ka): **Ing. Radim Zahradníček**
Program: **Elektrotechnika a komunikační technologie**
Studijní obor: **Mikroelektronika a technologie**
Vedoucí disertační práce: **doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.**
Oponent disertační práce: **Dr.- Ing. Jan Macák**

Název disertační práce:

Aplikace grafenu v elektronice a technologie přípravy

Celkové slovní hodnocení:

Tato disertační práce popisuje použití grafenu v různých formách, připravených různými způsoby, jeho charakterizaci a následné využití pro různá elektronická zařízení, konkrétně solární články na bázi Schottkyho přechodu a biosenzor (dále jen zařízení). Tento dvojdimenzionální materiál má optimální elektronické vlastnosti, vysokou elektrickou vodivost, chemickou a mechanickou odolnost, atd. V práci jsou také využity sesterské vrstevnaté materiály na bázi chalkogenidů přechodných kovů. V současné době je tématika využití těchto materiálů hojně studována, jedná se o velmi aktuální výzkumnou tematiku napříč různými obory. Velkou výzvou je také využití grafenu v zařízeních, jako např. studovaném solárním článku, kdy je potřeba materiál vhodným způsobem zpracovat a deponovat v té správné formě do té správné podoby. Celkově odpovídá námět a obsah práce jednoznačně oboru disertace (Mikroelektronika a technologie).

Originální přínos této práce spatřuji zejména v tom, že v práci je komplexně teoreticky i experimentálně popsán způsob přípravy grafenu a dalších 2D materiálů, jejich přenos na substrát pro budoucí elektronické zařízení, případně další úpravy (např. leptání) až po přípravu samotných zařízení a jejich testování. Pro realizaci těchto zařízení je využita řada specifických technik, od nejjednodušších (např. exfoliace) až po ty velmi složité, např. včetně moderních depozičních technik (CVD, ALD) a také litografických technik. Přínosné je právě to, že autor se soustředil na optimalizaci jednotlivých technologických kroků pro přípravu zařízení. Výsledkem je řada originálních technologických postupů a ponaučení, shrnutých v samotném závěru práce, z nichž si bude moct řada pracovníků v oboru vzít příklad a inspiraci. Design jednotlivých zařízení sensorů je velmi přehledně graficky znázorněn a doplněn vhodným textovým popisem, ve kterém je vždy možné nalézt originální aspekty práce.

Pro porovnání výkonosti připravených zařízení a jejich modifikací mohly být použity komerční zařízení na stejné bázi, což ale bohužel nebylo realizováno. Odezva evidentně ale není tak skvělá, jako by byla u těch nejlepších zařízení, je ale dostatečně dobrá.

Z přehledu publikací (včetně těch na webu VUT) je zřejmé, že výstupy práce byly publikovány v několika mezinárodních recenzovaných publikacích s IF a několika konferenčních příspěvcích. Pan Zahradníček v nich vystupuje jako hlavní autor pouze na jednom konferenčním příspěvku, v naprosté většině figuruje jako

druhý nebo další autor, což je na škodu práci. Celé disertaci tak chybí zásadní článek o využití grafenu v některém ze studovaných zařízení. Musím tedy konstatovat, že jádro disertační práce bylo publikováno na kvantitativně nižší úrovni, než je běžné.

Z hlediska jednak zaměření a obsahu disertační práce, tak i dosažených výsledků lze jednoznačně konstatovat, že Ing. Radim Zahradníček je student s dobrou vědeckou erudicí. Práce je velmi multidisciplinární a má přesah mezi materiálovými vědami, nanofabrikací, elektronikou a elektrotechnikou a sensorikou. Postupy uvedené v práci mají aplikační potenciál, který ale není nijak extenzivně adresován a nebyl přetaven do dostatečného počtu dostatečně kvalitních publikačních výstupů.

Dle mého posouzení tato práce do značné míry odpovídá vysokým standardům pro udělení akademického titulu Ph.D. **Celkově hodnotím práci jako akceptovatelnou. I přes některé věcné nedostatky uvedené popsané níže doporučuji práci k obhajobě.**

V Brně dne 16.7.2020

Dr. Ing. Jan Macák
Oponent disertační práce

Při četní disertační práce jsem přišel na tyto nesrovnalosti, které by bylo vhodné v práci adresovat/opravit/doplnit.

- 1) V textu je řada pravopisných chyb. V textu je také řada věcných chyb v názvosloví chemických látek, jsou zde zaměňovány různé skupiny chemických látek (chalkogeny s chalkogenidy, oxid cínatý s oxidem cíničitým, apod.), někde jsou uvedeny plné názvy, někde zase jen zkratky, apod. Je jasné, že student není a nebude chemik, to je pochopitelné, má jiné zaměření. Text ale mohl být podroben předem editaci chemikem.
- 2) V části věnované atomární depozici vrstev oxidu hlinitého je viditelně nějaký problém s vrstvou o nominální tloušťce 3 nm. Její výsledky jsou zcela mimo trend od ostatních vrstev s podobnou tloušťkou, a toto není vůbec nijak diskutováno. Viz např. obr. 56+57 a relevantní text.
- 3) Sekce 3.1.1. První věta končí „rozdělit do 4 samostatných skupin“. Bylo by vhodné už přímo tady napsat do jakých a nějak je pak v samotném textu označit (např. podtržení), protože pak najít všechny 4 skupiny v dalších několika stranách textu je pracné.
- 4) Sekce 3.2. Molekuly plynu nebo kapalin jsou na pevných látkách adsorbovány, nikoliv absorbovány. Navíc to, že nějaký materiál má velkou měrnou plochu, ještě neznámá, že může adsorbovat jakýkoliv materiál. Zde hrají roli různé iontové, vazebné, atd. interakce a síly.
- 5) Sekce 4 Cíle disertační práce: autor popisuje co a jak, chybí ale adresovat „proč“. K čemu to celé je.
- 6) Obr. 54 by mohl být větší, aby byly vidět jasně jednotlivé komponenty.
- 7) Sekce 5.6.4 Věta „Prvním prekursorem je vždy organokov“. Toto tvrzení není pravdivé, jsou i jiné látky, které jsou skvělými ALD prekursori, např. chloridy, fluoridy, atd.
- 8) Obr. 61 Pokud mají stříbrné nanodrátky průměr 40 nm (nominální hodnota od výrobce), pak je nemožné aby na obr. 61 s měřítkem 5 mikrometrů byly takto dobře viditelné. Něco je špatně.
- 9) Obr. 62 Obrázek vykazuje nedostatky v měřítku, dle mého posouzení jsou uvedeny špatné rozměry u 62b. U 62a chybí měřítko.

- 10) Tabulka 19 a její diskuze. Bylo by dobré uvést, na základě jakých podílů autor došel k násobkům 172 a 18x.
- 11) Str. 63, první věta, je nutné specifikovat, o jakou vzdálenost děr se jedná, jestli o mezistředovou, nebo jinou.
- 12) Obr. 70 Na tomto obrázku difúzní reflektance je vidět harmonická vlna pro vzorek „po“. Čím si ji autor vysvětluje?
- 13) Str. 71, význam zkratky FWHM je uveden špatně, znamená to „Full width at half maximum“