

Oponentní posudek na diplomovou práci posluchačky Bc. Pavly Béréšové na téma *Preparation and characterization of plasmonic nanostructures*

Předložená diplomová práce slečny Pavly Béréšové, vykonaná na Katedře inženýrství pevných látek FJFI ČVUT v Praze, ve spolupráci s ústavem IPHT v Jeně, Německo, je věnována teoretickým základům, simulacím, přehledu metod přípravy a charakterizace a zejména experimentální realizaci v perspektivní oblasti aplikované nanoplazmoniky - senzorce, v tomto případě na detekci plynu CO. Práce se zabývá jednak úvodní teoretickou rešerší dané problematiky (fyzika plazmonových rezonancí, metody přípravy a charakterizace), dále zejména pak vlastními experimentálními aktivitami. Takováto problematika představuje dnes, díky svým novým možnostem, perspektivní a efektivní část fyzikálně optického, materiálového a senzorického výzkumu, nejenom z pohledu nových vlastností, ale i díky perspektivním aplikacím. Jedná se tedy o téma diplomové práce velmi aktuální. Práce dle mého názoru, představuje užitečný souhrn znalostí, v rámci pracoviště školitele i fakulty, na kterou bude možno jistě s výhodou dále navazovat, v dalším výzkumu.

Posuzovaná diplomová práce je psána v anglickém jazyce, má 82 stran, obsahuje 59 obrázků, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 78. Práce je členěna do 4 hlavních, číslovaných kapitol, spolu s úvodem, závěrem, přehledem použité literatury a dodatkem A (o 5 částech). Po velmi stručném úvodu (ve kterém mi osobně chybí shrnutí cílů práce a také formální struktura textu práce, podle jednotlivých kapitol), je v 1. kapitole představen teoretický úvod - základy fyziky plazmonů, zahrnující šířivé a lokalizované povrchové plazmony. Zde bych uvítal podrobnější diskuzi k disperzním modelům plazmonických prostředí a jejich vlivu na rezonanční efekty. V textu je pouze stručně uveden Drudeho model s tlumením (zde nesprávně nazvaný Drudeho- Lorentzův model). Užitečný by byl také graf této disperze (v textu je sice uvedeno, že závislost je znázorněna na obr. 1.3, zde je však uvedena pouze disperzní závislost SPP – zřejmě nedošlo při úpravě grafu již k adekvátní úpravě v textu). V této části práce je dále zpracována teorie lokalizovaných plazmonů, zajímavý a inspirativní je ne běžně uvažovaný přechod mezi šířivými a lokalizovanými plazmony, inspirovaný dle práce [34]. Dále je představena kvazistatická aproximace, vedoucí k analytické předpovědi účinných průřezů absorpce a rozptylu, a také základy rigorózní Mieho teorie. Zde by byla vhodná grafická prezentace výsledků kvazistatické a Mieho teorie, spolu s jejich porovnáním a diskuzí, toto bohužel v práci není. Další 2. kapitola se již věnuje charakterizaci struktur a příslušné instrumentaci. Stručně jsou zde komentovány základní používané metody charakterizace: AFM, mikroskopie temného pole, spektroskopická charakterizace, mikrofluidika, technika zeslabené totální reflexe (ATR). Ve třetí kapitole se již autorka věnuje popisu vlastních experimentálních aktivit, s využitím dříve popsaných metod. Pozornost je věnována metodám přípravy nanostruktur – základní metoda přímé a inverzní koloidní litografie je dále modifikován: *hole-mask* a *AFM* litografie, respektive technika pro vytváření periodických polí nanostruktur (pomocí systému Nano-Plotter). Jednotlivé koncepty jsou názorně komentovány. Dále se diplomantka věnuje přehledu používaných proteinů, zejména myoglobinu pro detekci CO. V další části se autorka již věnuje vlastnímu návrhu senzoru a také simulacím (s využitím nástroje Comsol). V následující 4. kapitole jsou představeny výsledky DP: testovací simulace, realizace homogenního souboru nanočástic pomocí koloidní litografie a následná statistická analýza, depozice zlata a charakterizace připravených vrstev pomocí ATR techniky, resp. realizace inverzní koloidní litografií. Dále jsou uvedeny výsledky, získané pomocí technik *hole-mask* a *AFM* litografie, je diskutována stabilita realizovaných struktur, je provedeno srovnání se simulacemi. Závěrem je popsána kalibrace mikrofluidního systému a vlastní měření proteinů, včetně porovnání se simulacemi. Práce je formálně zakončena stručným závěrem a Dodatkem (o 5 částech): protokoly přípravy substrátů, realizace mikropolí nanočástic, simulace proteinů a přehled použitého laboratorního vybavení. Text je zakončen bohatým přehledem použité literatury (78 položek).

Po formální stránce je práce zpracována na dnes již standardní, velmi pěkné grafické úrovni. Formální chyby nejsou časté a jsou drobnějšího charakteru. Využití obrázků a grafů je adekvátní. Práce je psána velmi dobrým anglickým jazykem, pokud mohu posoudit. Pokud se týká terminologie a správnosti definic a zavedení veličin, nenašel jsem žádné problematické či nesprávné použití. Dle mého názoru je struktura vlastního textu zvolena vhodně, text je vyváženou kombinací obecných poznatků a vlastních praktických zkušeností. Osobně bych ale uvítal více přehledu o aktuálním stavu problematiky z pohledu senzorů (zejména ve vazbě na detekci CO a další).

Pokud se jedná o věcnou stránku, je zřejmé, že cíle předložené diplomové práce byly splněny, jednalo se o náročné zejména experimentální téma, s provedení zajímavých experimentů, kombinující možnosti domácího (KIPL) a zahraničního spolupracujícího pracoviště (IPHT Jena).

Z odborného hlediska, pro další rozvoj problematiky na fakultě (též v souvislosti s rozvojem oblastí kvantových technologií) tak považuji tuto diplomovou práci za velmi přínosnou a užitečnou. Jsem přesvědčen, že výsledky mohou být významné pro další pokračování problematiky, studentka tak dle mého názoru zvládla náročnou experimentální problematiku velmi dobře, jakož i problematiku simulací.

K předložené diplomové práci mám následující dotazy, resp. připomínky, ke kterým by se autorka mohla v rámci obhajoby (pokud časové možnosti dovolí) vyjádřit:

- 1) Jak jsem již upozorňoval v textu, poprosil bych o vyjasnění rozdílu mezi Drudeho a Drudeho-Lorentzova disperzního modelu. Setkala se diplomantka v rámci své práce i s dalšími používanými disperzními modely? Jaké konkrétně použila v rámci simulací v Comsolu?
- 2) V souvislosti s grafem 1.3 by mne zajímalo, jak by se disperzní křivka SPP změnila pro případ započtení efektu tlumení?
- 3) Mohla by se diplomantka pokusit navrhnout jiný typ struktury – rozhraní (ne nutně plazmonického typu), které by také podporovalo existenci povrchových lokalizovaných vln.
- 4) Zaujal mne komentář o alternativním popisu lokalizovaných plazmonů, pomocí přechodu od širivých, na základě Khurginovy práce (reference [34]), mohla by autorka v této souvislosti blížeji fyzikálně komentovat obrázek 1.7?
- 5) V souvislosti s porovnáním metod pro analýzu lokalizovaných SP (kvazistatická, Mie), mohla by diplomantka komentovat, dle své zkušenosti, platnost (použitelnost) předpovědí kvazistatické aproximace (v relaci s velikostí nanočástice, apod.).
- 6) Mohla by diplomantka přiblížit používaný experimentální setup ATR (v sekci 2.5 je pouze stručně zmíněna fyzikální podstata)?
- 7) Mohla by studentka stručně komentovat své praktické zkušenosti z modelování nanoplazmonických sensorových struktur, pomocí nástroje Comsol (používaný HW, doba výpočtu, testování dostatečné přesnosti, atd.).
- 8) Autorka studovala specifický protein, umožňující vazbu na plyn CO. Jaké jsou možnosti zobecnění tohoto přístupu, pro aplikaci detekce dalších plynů, v návaznosti na alternativní vhodné proteiny?
- 9) Konečně, plánuje studentka pokračovat v dané či příbuzné problematice i v rámci doktorského studia, ať již na fakultě, či jinde (zahraničí)?

Závěrem lze konstatovat, že předložená diplomová práce slečny Pavly Běřešové dle mého názoru splnila zadání, studentka zvládla jak náročné experimentální techniky, tak metodiku numerických simulací. Diplomantka dosáhla několika zajímavých výsledků, čímž splnila i veškeré požadavky na tento typ práce kladené. Jelikož předpokládám pozitivní reakce na vybrané dotazy a připomínky, jakož i kvalitní vlastní prezentaci, práci doporučuji k obhajobě a hodnotím, i přes drobnější nedostatky, stupněm **v ý b o r n ě (A)**.

.....
Ivan Richter
Katedra fyzikální elektroniky
FJFI ČVUT v Praze

V Praze dne 14. července 2020