



## FYZIKÁLNÍ ÚSTAV

Akademie věd České republiky, v. v. i.

Cukrovarnická 10, 162 53 Praha 6, Czech Republic

tel : +420-220 318 501

fax: +420-233 343 184

e-mail: fejfar@fzu.cz

Prof. RNDr. Z Němeček, DrSc.  
k rukám: Ing. J. Jágrová,  
studijní oddělení-doktorské studium  
Matematicko-fyzikální fakulta UK  
Ke Karlovu 3,  
121 16 Praha 2

V Praze dne 28.12.2010

### **Oponentský posudek dizertace Mgr. Milana Berty, „Development and applications of near-field imaging methods in the terahertz spectral domain“**

Dizertace je výsledkem originálního výzkumu zaměřeného na využití metod blízkého pole v THz oblasti EM vln. Již z této věty je zřejmé, že je zaměřena na překryv dvou intenzivně zkoumaných oblastí a že její cíl, tedy hledání možností, jak zvýšit prostorové rozlišení při využití THz spektroskopie, je velmi zajímavý. Práce přitom navazuje na předchozí koncept MDP (metal-dielectric probe) pocházející ze spolupráce této laboratoře s N. Kleinem z Jülichu. Pan Berta ve své dizertaci tento koncept dále rozvíjí a používá k získání prostorového rozlišení na úrovni 10  $\mu\text{m}$  nebo lepší na vzorcích  $\text{BaTiO}_3$ , přičemž také poprvé pozoroval citlivost na lokální anisotropii. Použití konceptu MDDP (metal-dielectric dual probe) se mi jeví jako zcela originální (i přes skeptické hodnocení dosavadních výsledků v části 3.8). Celkový dojem z dizertace tedy je, že p. Berta tento směr výzkumu významně rozvinul a dosáhl originálních vědeckých výsledků.

Práce je přehledně uspořádána do 4 kapitol. První kapitola uvádí úvod s motivací a také velmi podrobnou rešerši dosavadních výsledků. Tato kapitola nebyla pro mne vždy srozumitelná, ale přece jen jsem zaměřen na jiný obor a autorův záměr jistě nebyl psát úvodní text. Pečlivost zpracování rešerše je zřejmá i z 20 stránkového seznamu odkazů (tedy zřejmě více než 300 odkazů). Zběžná kontrola odkazů sice odhalila několik překlepů např. ve jménech autorů, ale jinak lze rešerši jen chválit.

Při čtení textu mne zarazily některé údaje: např. na str. 38 autor uvádí pro křemík hodnotu indexu lomu 3.41, z textu však není zřejmé, pro jakou je to frekvenci (jinak disperze křemíku může hodnoty měnit, v optické oblasti dokonce velmi výrazně). Stejně tak shoda hodnot indexu lomu 3.41 pro Si a  $n_{\text{eo}} \text{Al}_2\text{O}_3$  mne zarazila (při psaní posudku ale nemám k dispozici možnost hodnoty ověřit).

Zaujalo mne, že výroba sond se zřejmě dařila lépe v optických dílnách Fyzikálního ústavu AV ČR než ve firmě CrysTec GmbH (což je jistě poklonou pro tým Jiřího Fryštackého, ale stejně tak je třeba vyzvednout, že autorův tým spolupracuje s potenciálním výrobcem).

Z kapitoly 2 plyne, že pan Berta osvědčil nejen schopnost experimentální práce v laboratoři, ale prováděl i simulací experimentů pomocí komerčního softwarového prostředí

CST Microwave simulator a nakonec i náročné statistické zpracování dat (především) v prostředí R.

Zpracování dat pomocí multivariátní analýzy (MVA) je samo o sobě náročným oborem. Posoudit oprávněnost postupů, které autor použil, není snadné. Nicméně, text dizertace ukazuje, že i autor si kladl otázky o smyslu např. předběžné úpravy dat (data pretreatment) a tato část práce působí poctivě. Podobné postupy v našem případě vedly k cenným výsledkům (faktorová analýza byla použita pro nalezení nezávislých komponent v Ramanovských spektrech mikrokystalického křemíku se směsnou strukturou). Nicméně, v našem případě byla úvaha snazší v tom, že signály různých komponent jsou ve spektru aditivní. Není mi jasné, zda lze MVA použít pro THz časové profily a zda by správnější nebylo použít analýzu např. na jejich Fourierovský obraz (ale to je samozřejmě dáno tím, že na rozdíl od autora nejsem zvyklý číst TDTS spektra). Otázkou také je, zda by nebylo možné najít alespoň některý modelový experimentální systém, kde by měření bylo možné interpretovat přímočařeji a jehož výsledky by mohly fungovat jako reference.

Výsledky scree-plotů získaných jak simulací, tak i z experimentálních dat a jejich vzájemného srovnání jsou přesvědčivé. Velmi působivé je srovnání měřených a simulovaných dat v obr. 3.12. Zajímavý výsledek je pozorování dvou citlivých oblastí sond a použití sondy s nakloněnou přední stěnou pro omezení interakce jen na jednu oblast (obr. 3.18).

Nakonec, měření BaTiO<sub>3</sub> domén a detekce domén s rozměry pod 10 μm a s citlivostí na lokální anizotropii vypadá také velmi nadějně, byť výsledky v kapitole 3.7 jsou jistě na hranici současných možností. Autor bezpochyby učinil významný pokrok ke zobrazovací THz spektroskopii s využitím blízkého pole pro získání rozlišení hluboce pod vlnovou délkou.

Závěrečná kapitola prezenuje i výhled do budoucna s návrhy na další zlepšení.

Celkový dojem z dizertace je výborný i po formální stránce. Autor do práce zahrnul přes 70 obrázků, z nichž ale většina je složena z řady dalších – to je mimořádný objem práce. Práce je mimořádně pečlivě zpracovaná z hlediska potřeb čtenáře: např. obsahuje seznam obrázků, tabulek, seznam použitých symbolů a zkratk.

Práce je psána pěknou angličtinou, což spolu s elektronickou formou zvyšuje její význam jako publikace výsledků. Do práce se přesto vloudily překlepy a místy i prohřešky proti anglické mluvnici, ale jejich množství je malé. Místy je poznat, že pro autora přece jen není angličtina rodným jazykem: např. na str. 38 autor uvádí: „For the continuous-wave (CW)-MW measurements, we have disposed of two samples: undoped gallium nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) ... and GaN ... platelets.“ – autor jistě neměl na mysli, že pro měření vzorky zlikvidoval, jak zní doslovný překlad věty); obdobně použití slova platelet v angličtině obvykle nemá význam destičky v tom smyslu, jak ho autor používá, ale používá se pro trombocyty nebo mikroskopické vodní útvary. Nicméně, tyto výhrady nemají vliv na srozumitelnost textu.

V rámci obhajoby práce prosím pana Bertu, aby vysvětlil, jak byly nanášeny kovové vrstvy (Ti, Ag, Au) na Si a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sondy, jak probíhal proces jejich přípravy a co je známo o tom, jak přesně vrstvy končí na hraně sondy, případně, zda existuje možnost přesahu kovových vrstev na plochu, kterou sonda končí (při mikrometrové tloušťce stříbrné vrstvy bych se nedivil, kdyby na této ploše existoval tenký, rychle ubývající film stříbra, který by ale mohl THz vlny ovlivnit). Naproti tomu, příprava teflonových sond je v práci popsána podrobně, ale i zde očekávám, že odříznutí špičky může zanechat na okraji kovové vrstvy stopy po procesu řezání. Jak bylo odříznutí provedeno? Očekával bych, že nerovnosti kovové vrstvy mohou mít na průběh blízkého pole velký vliv (viz obr. 2.18 na str. 59 nebo zmínka na str. 61).

Autor uvedl na str. 75, jak jeho výsledky navazují na předchozí práci spolupracujících týmů N. Kleina a P. Kužela. Nicméně, i přesto prosím, aby v rámci obhajoby pan Berta konkrétně zhodnotil svůj autorský podíl – jak se např. podílel na návrhu sond (ostatně, vycházel tvar sond z možností jejich přípravy nebo již od počátku z fyzikální úvahy?) , čím byl inspirován návrh dvojité sondy atd.

Nakonec nezbývá než se také zeptat, co znamená maďarský text na str. *i*.

Závěrem konstatuji, že předložená disertační práce splnila stanovený cíl, vztahuje se k aktuálnímu tématu, a že pan Milan Berta měl nepochybně na získaných výsledcích zcela zásadní podíl, a tak nepochybně osvědčil schopnost vědecky pracovat. Pan Berta uvádí na str. *vi*, že je autorem 2 publikací, lze však dohledat, že je spoluautorem ještě dalších nejméně 7 publikací (z toho 3 článků v impaktovaných časopisech, jeho záběr tedy zřejmě překračuje i předloženou dizertaci.

Doporučuji proto udělení akademického titulu Ph.D. a těším se již na obhajobu.

RNDr. Antonín Fejfar, CSc.