

# Oponentní posudek disertační práce RNDr. P. Ballinga

## „Laser Frequency Stabilization and Measurement of Optical Frequencies“

Psát oponentní posudek na disertační práci P. Ballinga není nijak jednoduché. Jedná se totiž o velmi obsažnou disertaci obsahující výsledky mnohaleté, systematické a cílevědomé práce, která byla průběžně podřizovaná té nejnáročnější oponentuře – mezinárodním porovnávacím měřením. A z těchto porovnávaní vychází výborně a na základě těchto výsledků je ČMI a jeho LPM vysoce uznávaná i ve světě. Jen málo experimentálních prací je podrobováno tak náročnému hodnocení!

Výrazným rysem celé práce je její zaměření na praktické použití výsledků v metrologii. Z tohoto hlediska jsou formulované i hlavní cíle práce. Proto na obvyklou otázku o aplikovatelnosti výsledků disertace v praxi je zcela jednoznačná odpověď: Práce má zásadní význam pro českou metrologii (autor disertace je garantem „Českého státního etalonu délky“) a přispívá významným způsobem také k rozvoji světové metrologie.

Práce je obsahově velmi hutná, řada řešených náročných problémů je popsána na méně než jedné straně textu, přičemž autor důsledně dodržuje pracovní schéma: formulace problému, jeho analýza a řešení, provedení reálných opatření (experimentální zařízení, hardware, software), měření, jeho vyhodnocení včetně stanovení reprodukovatelnosti, posouzení relevantních fyzikálních vlivů na měření a stanovení přesnosti měření. Téměř všechny v práci uvedené výsledky prošly náročnou oponenturou mezinárodními porovnáními s významnými metrologickými pracovišti, která určují úroveň světové metrologie. Je třeba konstatovat, že na základě výborných výsledků, na nichž má zásadní podíl autor této práce, je česká metrologie uznávanou součástí mezinárodní metrologické obce.

Disertace je členěná obvyklým způsobem. Úvodní kapitola (3.) je věnovaná přehledu problematiky měření optických frekvencí a aplikacím v metrologii. Autor zasvěceně a úsporně uvádí hlavní principy a vývoj metrologie délky až do současnosti. Kapitola je doplněná stručnou historií československých a českých frekvenčně stabilizovaných laserů pro metrologické využití -- na jejich vývoji se významně podílel také autor disertace. Vrcholem této systematické činnosti bylo vyhlášení „Českého státního etalonu vlnové délky“. Jeho součástí jsou vedle zmíněných laserů také acetylenem stabilizovaný laser a fs laserový hřebek, které jsou pojednávány v této práci.

- Těžištěm disertační práce je řešení dvou jasně definovaných úkolů/problémů:
- 1) Realizace acetylenem stabilizovaného laseru pro metrologii v oblasti optických komunikací (kap. 4),
  - 2) Přesné měření laserové frekvence s použitím optického frekvenčního hřebene generovaného femtosekundovým laserem (kap. 5).

Každý z problémových okruhů je vždy uvedený zasvěceným, stručným teoretickým výkladem a stavem řešené problematiky.

Komentovat jednotlivé výsledky disertace není prakticky možné. V závěrech v kap. 7. je jich uvedeno celkem 18 (při obvyklém způsobu prezentování by každý z nich snadno vydal na kapitolu o několika stranách). Oceňuji proto autorova věcné, stručné a přitom přesné vyjadřování. Nevýhodou pro autora ale je, že není zřejmá skutečná náročnost a pracnost řešení často netriviálních problémů.

Chtěl bych vyzvednout část práce z kap. 4. věnovanou sub-dopplerovské spektroskopii acetylenu pro stabilizaci DFB laseru a především zvolenou koncepci i realizaci etalonu ČMI Ethyn-1. Příkladem pečlivosti a dokladem metodiky vědecké práce může sloužit tab. 9 na str. 29,

ve které jsou pro výpočet celkové neurčitosti vlnového etalonu uvedeny výsledky studia vlivu modulace, tlaku a výkonu na frekvenci. Neurčitost etalonu ČMI Ethyn 1 činí 3,5 kHz proti požadované neurčitosti CCL (2005) 5 kHz!

Druhou částí disertace, která mě zaujala je práce s fs laserem. Chtěl bych se zeptat, jak kritické je nastavení skleněných klínů v rezonátoru laseru (jaký má vliv na výkon laseru a na kvalitu záření) a na problémy se světlem rozptýleným na optických elementech systému. Fascinující je závěrečné absolutní měření frekvence (odst. 5.3 – 5.5). Autorovi se podařilo prokázat, že krátkodobou stabilitu laserových standardů (konkrétně YAG 1 s hodnotou  $4 \times 10^{-13}$  rel. pro 1 s), která je lepší než mají GPS Rb či komerční Cs hodiny lze přenést prostřednictvím fs hřebene ČMI do celého spektrálního rozsahu hřebene se zanedbatelnou odchylkou. Tím bylo prokázáno, že celková rozšířená nejistota frekvence mezi optickými elementy různých vlnových délek, tj. i z optických etalonů do radiofrekvenční oblasti pomocí fs hřebene ČMI činí  $2,5 \times 10^{-15}$  rel. pro 1s vzorky a méně nebo  $2,4 \times 10^{-16}$  rel. pro vzorky 100s.

Originálním výsledkem disertace je

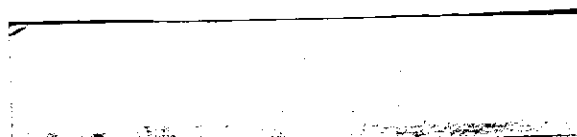
- realizace vlnového etalonu pro optické komunikační účely založeného na (bezrezonátorovém) DBF laseru stabilizovaném na sub-dopplerovské přechody (ČMI Ethyn),
- měření jeho vlnové délky přímo infračerveným fs hřebenem.

Autor v disertaci cituje 67 prací, bohužel nejsou zvlášť uvedené nebo vyznačené práce autora bezprostředně související s disertační prací. Domnívám se, že z citovaných prací je P. Balling autorem/spoluautorem 9. časopisecky publikovaných prací a 6. dalších prací (zprávy, konferenční příspěvky). K obhajobě by autor měl uvést úplný seznam vlastních publikací s vyznačením těch, které obsahují výsledky zařazené do disertace a také seznam citací jeho prací.

Problematika řešená v disertaci je nesporně velmi aktuální. Díky dosaženým výsledkům se ČMI LPM zařadila mezi přední světová metrologická pracoviště a některá z nich dokonce i předběhla!

Po formální stránce je práce zpracovaná velmi pečlivě a lze jí vytknout pouze až přílišnou stučnost. Kromě klasické „svázané papírové“ práce je přiložená elektronická verze na CD.

Na úplný závěr musím konstatovat, že předložená **disertační práce přesvědčivě prokazuje autorovu schopnost samostatné tvořivé práce** (a nikoliv pouze „předpoklady k samostatné tvořivé práci“) a práci k obhajobě doporučuji.



V Praze dne 22. února 2010.

Doc. RNDr. Jaroslav Pantoflíček, CSc