

FS004 — Státní závěrečná zkouška Bc

Průvodní text k obhajobě

Petr Šafařík

Slide 1

Vážení členové komise, vážení přátelé;

dovolte mi, abych se zde v krátkosti pokusil prezentovat svou bakalářskou práci — Metody stanovení indexu lomu vzduchu. Tato práce vznikala souběžně zde, na Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky a dále na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a zabývá se metodami užívanými ke stanovení hodnoty indexu lomu vzduchu.

Nejpřesnější metodou stanovení délky v dnešní době je ovšem laserová interferometrie. Nepostradatelným parametrem pro stanovení takto měřené vzdálenosti je vlnová délka interferujícího laserového světla.

Tato se určí jako podíl rychlosti světla v prostředí, ve kterém se laserový paprsek šíří ku jeho frekvenci. Ovšem na rozdíl od frekvence rychlost světla záleží na prostředí, ve kterém se šíří. Každé prostředí je tak definováno indexem lomu prostředí, což je podíl rychlosti světla ve vakuu ku rychlosti světla v prostředí.

Většina interferometrických měření probíhá na vzduchu, proto je třeba znát aktuální hodnotu indexu lomu vzduchu s maximální přesností.

Slide 2

Metod ke zjištění indexu lomu vzduchu je několik. První a nejpoužívanější je nepřímá metoda pomocí tzv. Edlénovy formule; respektive tvaru upraveného Romanem Fírou v takzvané Fírově formuli. Jedná se o empiricky zjištěnou závislost indexu lomu na fyzikálních vlastnostech atmosféry. Těmito se myslí tlak, teplota, relativní vlhkost a obsah CO_2 .

Fírova formule je méně obecná. Originální Edlénův vzorec zahrnoval disperzní člen, tedy závislost indexu lomu na vlnové délce. Tento byl odstraněn prepočtem pro Helium-Neonový laser, tedy pro vlnovou délku asi 633 nm. Dále v originálním vzorci je vlhkost vyjádřena v parciálním tlaku vodních par, což je parametr, který se měří velice těžko. Přepočítaný Fírův vztah ovšem používá relativní vlhkost, která se určuje o poznání snáze.

Další dvě v práci zkoumané metody jsou metoda s využitím Michelsonova interferometru a nová metoda s využitím Fabry-Perotova rezonátoru.

- Nepřímá metoda – Edlénova formule
- Michelsonův interferometr
- Interferometr typu Fabry-Perot



Obrázky z <http://fordsart.blogspot.com>

Slide 3

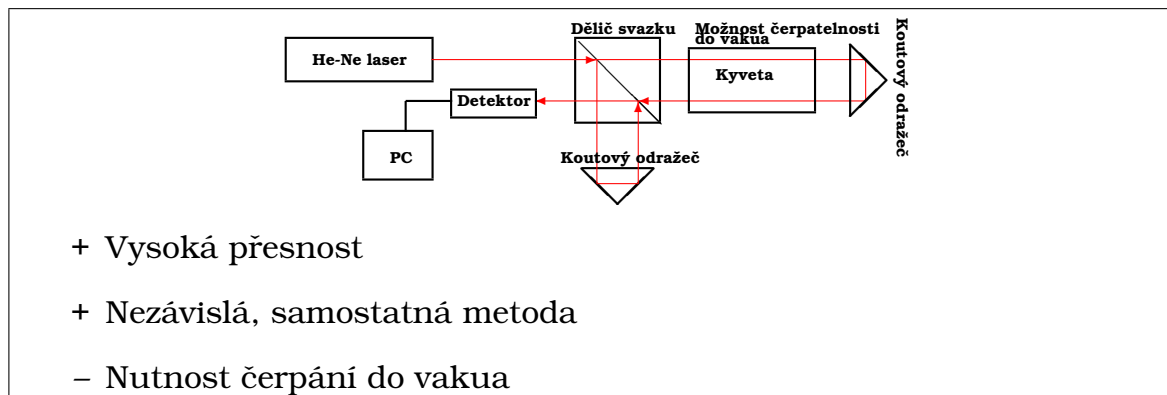
Metoda užívající Michelsonův interferometr je již metoda přímá, narozdíl od Edlénova vzorce. Michelsonův interferometr má obecně dvě ramena, přičemž jedno je bráno jako referenční a druhé jako měřicí.

V našem uspořádání byla obě ramena rovnoběžná v minimálním vzájemném rozestupu tak, že se dalo předpokládat, že obě prochází naprosto stejným prostředím až na část, kde jedno rameno procházelo čerpatelnou kyvetou a druhá nikoli. Vlastní postup měření je popsán detailně v mé práci na stranách 17–20.

Díky fotodetektoru s vysokou rozlišovací přesností (zlomky vlnové délky) je tato metoda velice přesná. Rozlišení hodnoty indexu lomu vzduchu měřené touto metodou je až 10^{-8} .

Jedná se o samostatnou metodu, to znamená, že k výsledku není potřeba provádět žádná jiná měření, než měření popsaná v mé bakalářské práci. Konkrétně je třeba znát vlnovou délku laserového světla ve vakuu, délku kyvety, ve které se prostředí liší.

Měří se následně počet interferenčních maxim či minim, které se na detektoru objeví v průběhu čerpání kyvety, které tuto metodu provází. Toto čerpání ovšem brání nasazení této metody do komerčního provozu.



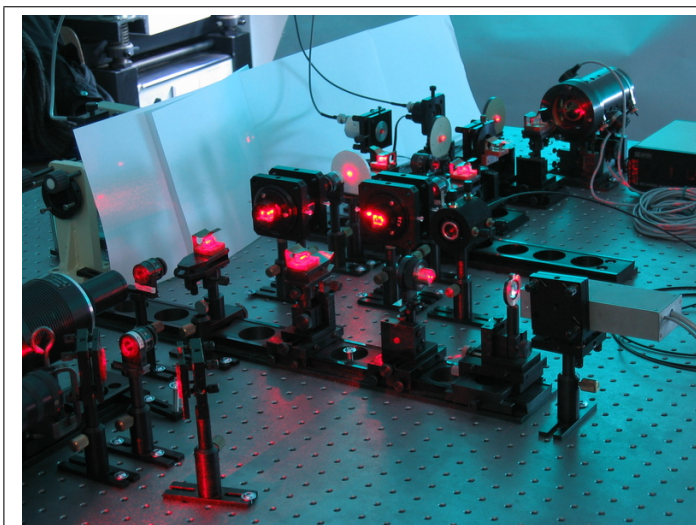
Slide 4

Nutnost vakuového čerpání tedy vedla k vypracování nové metody měření indexu lomu vzduchu. Tato byla hlavním předmětem mé bakalářské práce — její studium a následné ověření.

Tato metoda využívá hodnoty indexu lomu vzduchu získané dosažením stavových veličin měřeného vzduchu do Edlénovy formule, které následně zpřesní. V našem případě byly výsledky zpřesněny o dva řády.

Celý princip metody je opět popsán v předložené práci. Metoda nepotřebuje vakuového čerpání, ovšem v tuto chvíli je tato nová metoda závislá na výsledcích Edlénovy formule. Námi dosažená přesnost není u této metody limitní. Odvíjí se od kvality použitého laseru — zde šířky emisní čáry a v kvality rezonátoru. Při zrcadlech s užší čarou spektrální propustnosti je možné tuto přesnost ještě zvýšit.

V tuto chvíli se pracuje na osamostatnění metody, aby byla nezávislá na výsledcích Edlénovy formule.



- Využívá Edlénovy formule
- Na základě FP rezonátoru zpřesní index lomu z Edlénovy formule
- Bez nutnosti vakuového čerpání
- Vysoká přesnost (10^{-8}) s možností jejího zpřesnění

Slide 5

Součástí mé práce bylo uvedenou novou metodu i prakticky ověřit. Praktická část se tedy skládala z sestavení a nastavení optických tras pro každou metodu a následném pořízení několika dlouhodobých záznamů.

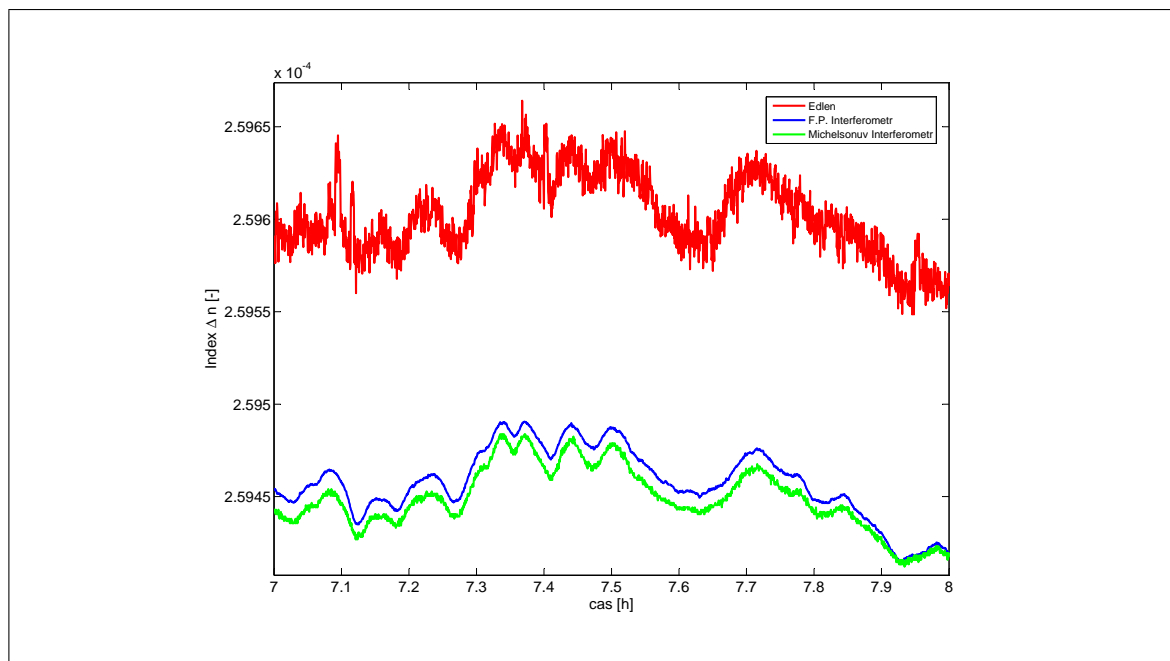
Bylo provedeno celkem na patnáct měření od dvouhodinového záznamu až po desetihodinové měření.

Uvádím jeden záznam z noci z 15. na 16. března 2007. Čas na ose X je v hodinách, přičemž počátek odpovídá okamžiku spuštění experimentu. Vybraný úsek mezi sedmou a osmou hodinou měření již odpovídá chvíli, kdy se v laboratoři ustálily podmínky vhodné pro měření.

Měření probíhalo v uzamčené laboratoři, aby výsledky nebyly ovlivněny případným pohybem osob.

Jak je vidět i na zde uvedeném záznamu, jsou rozdíly mezi novou metodou a nezávislou metodou s Michelsonovým interferometrem rozdíly jen nepatrné a pohybují se za hranicí přesnosti obou metod – tedy na vyšším než osmém řádu.

Dále je zde vidět, že až do šestého řádu se shodují všechny tři metody určení indexu lomu vzduchu: Edlénova formule a obě interferometrické metody.



Slide 6

Děkuji za pozornost.

Reference

- [1] Edlén B. The refractive index of air. *Meteorologia*, 2:71–80, 1966.
- [2] Fira R. Index lomu vzduchu. *JMO*, 7–8, 1996.
- [3] Bönsch G. a Potulski E.
Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. *Metrologia*, 35:133–139, 1998.
- [4] Khelifa N., Fang H., Xu J., Juncar P. a M. Himbert.
Refractometer for tracking changes in the refractive index of air near 780 nm. *Applied Optics*, 37:154–161, 1998.

Slide 7

Věřím, že budete mít nějaké dotazy a doufám, že Vám na ně budu s to odpovědět. Prvně mě ovšem prosím nechte zodpovědět dva dotazy vznesené v posudku oponenta.

První byl na vztah pro Edlénovu formuli, resp. na její Romanem Fírou upravenou verzi. Buhužel se až do finální verze přes několikanásobnou kontrolu několika různými lidmi dostalo několik chyb. Jedna z nich se týkala i onoho vzorce, proto zde uvádím jeho snad správnou verzi. Na druhou část dotazu týkajícího se této formule — za jakých předpokladů byl odvozen — jsem doufám odpověděl v průběhu prezentace.

Druhý dotaz se týkal veličiny označované jako ν_{FSR} . Jedná se o mezimodovou vzdálenost. Jedná se o frekvenční vzdálenost mezi jednotlivými maximy v rezonančním spektru rezonátoru. Hodnota ν_{FSR} je závislá na převrácené hodnotě vzdálenosti zrcadel.

Tvar zrcadel hraje velice důležitou roli: všechny vztahy v kapitole 2.3 — Interferometr typu Fabry-Perot — jsou uvedeny či odvozeny pro rovinná zrcadla. Budou-li zrcadla parabolická, resp. libovolná jiná než planoparalelní, všechny vztahy se značně zkomplikují. Bude třeba brát v úvahu i geometrii systému.

Edlénova – Fírova – formule pro $\lambda = 633 \text{ nm}$

$$(n - 1) \cdot 10^6 = 2,87782 \cdot p \cdot \frac{[1 + p \cdot (6,01 - 0,0972 \cdot t) \cdot 10^{-6}]}{1 + 0,003661 \cdot t} - 6,49 \cdot H \cdot (1,00050 + 2,3 \cdot t + 3,1 \cdot p) \cdot \exp\left(\frac{-532}{t + 273,15}\right)$$

n je index lomu vzduchu, p je tlak v jednotkách [Pa], H je relativní vlhkost [%] a t je teplota ve [°C].