

Laser with narrow spectral linewidth for metrology of length

autor disertace: Ing. Minh Tuan Pham

školitel: Ing. Ondřej Číp, Ph.D., Ústav přístrojové techniky Akademie věd ČR

Ústav fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně

Aktuálnost tématu práce

Téma předložené disertační práce je z oblasti výzkumu přístrojové techniky pro optickou metrologii, a to jak pro optické atomové hodiny jako etalon pro měření času, frekvence a délky, tak pro určitá vysoce přesná spektroskopická měření. Výzkum a vývoj optických hodin se dostal do popředí zájmu vědy a výzkumu zejména po vynálezu hřebene optických frekvencí na přelomu milénia a v blízké době, pravděpodobně ještě ve 20. letech se očekává přijetí nové definice sekundy pomocí optických hodin. Výzkum a vývoj přístrojové techniky pro optické hodiny je tedy vysoce aktuální téma. V práci jsou zkoumány metody zúžení šířky čáry jednomódového polovodičového laseru na vlnové délce 729 nm a několik aplikací, ve kterých je vysoká stabilita a úzká spektrální čára laseru využita.

Metody zpracování

V rešeršní části autor podává srozumitelný a výstižný přehled znalostí potřebných k vysvětlení výsledků. Po základní přehledu vývoje časoměrné techniky a zejména optických atomových hodin popisuje podrobně současný stav znalostí v technice pro zúžení šířky čáry jednomódových laserů založených na polovodičovém optickém zesilovači a externím rezonátoru. Přehled techniky zúžení šířky čáry je volen s ohledem na zamýšlenou aplikaci, totiž spektroskopii přechodu $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 3d^2D_{5/2}$ iontu vápníku zachyceného v iontové pasti. Oceňuji uceleně a poutavě napsaný úvod s historickou retrospektivou vývoje atomových hodin a jejich aplikací. Z rešeršní části je zřejmé, že autor prokázal dobré pochopení teoretických základů i praktických technologických dovedností, které jsou důležité pro splnění cílů práce.

Výsledky a splnění cílů práce

Cíle disertační práce podle jejich popisu v závěru práce byly následující:

1. Analýza dostupných metod pro stabilizaci optické frekvence polovodičového laseru s externím rezonátorem, typ Toptica Ta-Pro L729, který jako takový má šířku čáry 300 kHz.
2. Implementace vybrané metody stabilizace vlnové délky a zúžení šířky čáry.
3. Ověření funkčnosti přístroje v experimentech.

Na základě detailní rešerše možných přístupů stabilizace vlnové délky a testování některých z metod autor vybral jako nejvhodnější metodu optické zavěšení optické frekvence laseru L729 na vysoce stabilní referenci, optický rezonátor s vysokým činitelem jakosti s řízením pomocí hřebene optických frekvencí na bázi módově synchronizovaného vláknového laseru a vodíkovým maserem.

Sestavení stabilizace představovalo náročnou multidisciplinární úlohu zahrnující mj. pokročilou vakuovou techniku, chlazení, elektroniku a řízení experimentu a zpracování signálu a samozřejmě množství dílčích úkolů z optiky, včetně vláknové optiky. Sestavu stabilizovaného laseru využil v řadě experimentů, zejména pro chlazení iontů vápníku zachycených v iontové pasti, Rabiho a Ramseyově spektroskopii, s jejíž pomocí určil zúžení šířky čáry na 29 Hz, odhad zbytkového tlaku ve vakuové nádobě a aplikace pro kvantově optické úlohy. Poslední dvě úlohy byly provedeny ve spolupráci s Univerzitou Palackého v Olomouci.

Metody měření i výsledky jsou dostatečně podrobně popsány a splnění deklarovaných cílů je zřejmé. Je patrné, že splnění cílů práce představovalo velké úsilí, zvláště v případě experimentálně náročného sestavování teplotně stabilizované vakuové části přístroje.

Formální úprava a jazyková úroveň

Práce je dostatečně přehledná, má všechny formální náležitosti a odpovídající úpravu. Je psána v angličtině a vysázena v systému LaTeX. I když byl text práce zřejmě pečlivě zkontrolován, přesto obsahuje množství drobných překlepů nebo stylistických nepřesností ze kterých se zdá, že text neprošel automatickou kontrolou „spell-check“ použitého textového editoru. Jedna z dalších nepřesností zřejmě vznikla chybou při kopírování: v tabulce 1.1 na str. 14 jsou u přechodů $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 4s^2P_{1/2}$ a $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 4s^2P_{3/2}$, uvedeny vlnové délky 396:847 a 393,366 nm a tytéž vlnové délky jsou u přechodů $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 3d^2D_{5/2}$ a $4s^2S_{1/2} \leftrightarrow 3d^2D_{3/2}$, kde však mají být vlnové délky 729 a 732 nm. V obrázku 1.5 jsou hodnoty uvedeny správně. Členění práce považuji za logické a úpravu výbornou.

Rovněž předložené teze disertační práce splňují formální náležitosti a vhodně a stručně vystihují obsah disertační práce doktoranda.

Vědecký přínos práce

Autor práce měl vynikající možnost podílet se na výzkumu přístrojů pro optické hodiny vyvíjené v ÚPT. Naskytnutých šancí velmi dobře využil ku prospěchu rozvoje této problematiky. Mohl též spolupracovat s řadou předních odborníků v oboru z různých výzkumných pracovišť, včetně zahraničních. Je to patrné ze seznamu publikací v příloženém životopise. Jedná se o 8 článků v impaktovaných časopisech a 8 konferenčních příspěvků. Ze tří publikací v renomovaných časopisech, které vybral do disertační práce je mezi prvními třemi autory (na jedné publikaci je prvním z autorů) a je tedy zřejmý klíčový podíl autora disertace na vzniku těchto prací.

Za významné výsledky a přínos považuji úspěšný vývoj zařízení pro stabilizaci polovodičového laseru a ověření jeho funkčnosti na několika konkrétních úlohách.

Splnění cílů

Podle mého názoru předložená práce splňuje všechny stanovené cíle a vyhovuje formálním a faktickým požadavkům kladeným na tento druh prací. Doporučuji proto práci k obhajobě před komisí a v případě její úspěšné obhajoby Minhovi Tuanovi Phamovi udělit vědecko-akademickou hodnost Ph. D. (doktor).

Otázky do diskuse při obhajobě

1. Autor se domnívá, že šumová komponenta zapříčiňující rozšíření čáry je způsobená nestabilizovanou optickou vláknovou linkou (např. na str. 62). Jaké použil optické vlákno pro toto propojení? Zvažoval pro toto propojení použít mikrostrukturní optické vlákno se vzduchovými otvory, tzv. „Hollow-core fiber“ ?
2. Na str. 14 autor uvádí hodnoty „branching ratio“. Mohl by uvést definici zde použitého dělicího poměru? Často se uvádí branching ratio v rozmezí 0 ..1, resp. 0 .. 100 %
3. Na str. 37 autor uvádí využití zařízení FNC, Fiber Noise Cancellation. Prosím o podrobnější informace o použité stabilizaci, jedná se o stabilizaci optické dráhy např. pomocí piezoelementu a jaká je mezní frekvence určující pak rychlost stabilizace?
4. Na str. 39 je uvedena opakovací frekvenci erbiového vláknového laseru. Pokud je to autorovi známo, jaká je konstrukce rezonátoru laseru (např. Fabryův-Perotův, kruhový, sigma rezonátor ...) a jeho délka?

V Praze, dne 2. března 2023

doc. Ing. Pavel Peterka, Ph.D.
Ústav fotoniky a elektroniky
Akademie věd České republiky, v.v.i.
Chaberská 57
182 51 Praha 8 – Kobylisy