

VEDECKÁ RADA FAKULTY ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
SLOVENSKEJ TECHNICKEJ UNIVERZITY V BRATISLAVE

RNDR. JANA GUTTENOVÁ

AUTOREFERÁT DIZERTAČNEJ PRÁCE

OPTICAL FREQUENCY STABILIZATION OF DIODE LASERS

na získanie vedeckoakademickej hodnosti

philosophiae doctor

v odbore 39-71-9 meracia technika

BRATISLAVA 2008

Dizertačná práca bola vypracovaná v internej forme doktorandského štúdia na Ústave merania Slovenskej akadémie vied v Bratislave.

Predkladateľ: RNDr. Jana Guttenová
Ústav merania SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava

Školiteľ: RNDr. Ing. Ján Bartl, CSc.
Ústav merania SAV
Dúbravská cesta 9
841 04 Bratislava

Oponenti:
.....
.....
.....

.....
.....
.....
.....

.....
.....
.....
.....

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h
na Ústave merania SAV, Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava, miestnosť č.
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce doktorandského štúdia vymenovanou
dňa predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore
39-71-9 meracia technika.

Predseda spoločnej odborovej komisie:

.....

Úvod

S príchodom laserových diód sa otvorili nové možnosti využitia ich malých rozmerov, nízkych požiadaviek kladených na výkon, vysokej účinnosti, relatívne nízkej ceny a dlhej životnosti [1]. Svoje využitie našli polovodičové lasery aj v spektroskopii vďaka svojmu prirodzene širokému profilu zosilnenia, ktorý umožňuje preladiťnosť v rozsahu rádovo desiatok nanometrov [2]. Cieľom predkladanej práce bolo vyšetriť možnosti zavedenia preladiťných polovodičových laserov na 633 nm vo fundamentálnej metrológii.

V deväťdesiatych rokoch prebiehala celosvetová tendencia a snaha nahradiť HeNe etalóny polovodičovými lasermi, neskôr Nd:YAG lasermi [3] a femtosekundovými hrebeňmi [4, 5, 6]. Tento trend sa na Slovensku nepodarilo udržať. Vývoj HeNe laserov sa spomalil až celkom stagnoval a preto aj funkciu národného etalónu dĺžky prevzal komerčne zakúpený laser Winters model vyrobený v USA. Účasť slovenskej metrológie teda chýbala aj na takom významnom podujatí, akým bolo medzinárodné porovnanie diódových laserov (ICLAD'99) usporiadané v roku 1999 v BIPM, Paríž [7].

Pre budúcnosť je však dôležité tento celosvetový trend aspoň reprodukovať. V roku 2003 preto začal výskum v oblasti stabilizácie frekvencie polovodičových laserov na Ústave merania SAV v spolupráci so Slovenským metrologickým ústavom spolufinancovaný agentúrou APVT a od roku 2007 grantovou agentúrou VEGA.

Hlavným cieľom tejto práce bolo zostavenie frekvenčne stabilizovaného polovodičového lasera pracujúceho na vlnovej dĺžke 633 nm a vyčíslenie jeho stability ako zdroja frekvencie v oblasti primárnej metrológie dĺžky. Čiastkové úlohy práce - tézy sú popísané v jej ďalšej časti.

Tézy dizertačnej práce

Jednotlivé úlohy definované v rámci riešenia tejto práce sú nasledovné:

- Zostavenie HeNe lasera SMU 4, ktorý má slúžiť ako referenčný etalón pri porovnávaní. Vykonať jeho justáž s jódomou kyvetou v rozšírenej rezonančnej dutine s využitím stabilizačnej elektroniky realizovanej Ústavom merania SAV.
- Vykonať sledovanie tepelnej rozťažnosti lasera SMU 4 meraním výstupného optického výkonu lasera.
- Vyšetriť vlastnosti polovodičového lasera, analyzovať zmeny optického výkonu a frekvencie polovodičového lasera v závislosti na teplote polovodičového čipu a injekčného prúdu laserovej diódy.
- Použitím metódy frekvenčných záznejov vyhl'adať optimálne parametre diódového lasera.
- Oboznámiť sa s inými metódami stabilizácie optickej frekvencie ako je metóda nasýtenej absorpcie molekulami jódu $^{127}\text{I}_2$ na kvantovom prechode R(127)11-5.

Metódy stabilizácie frekvencie

Nelineárna spektroskopia

V roku 1983 zostavil Medzinárodný výbor pre váhy a miery (CIPM) odporúčania pre praktickú realizáciu, označované aj ako *mise en pratique* definície, metra [8]. Tieto smernice odporúčajú zoznam optických nelineárnych efektov v plynách a kvapalinách, ktoré sú vhodné pre stabilizáciu frekvencie laserov využívajúc spektroskopiю s vysokým rozlíšením. Tieto procesy vychádzajú z prirodzenej schopnosti hmoty absorbovať energetické kvantum svetla s dôsledkom zmeny kvantového stavu. Napríklad, ak dvojatómoté molekuly plynu alebo kvapaliny osvetlíme vysoko koherentným svetlom, rozštiepenie základnej spektrálnej čiary na jemné a hyperjemné spektrum bude evidentné. Je to zapríčinené rotačnými a vibračnými pohybmi molekúl a ich vzájomnou geometrickou konfiguráciou. Keďže šírka čiar týchto hyperjemných zložiek spektra je rádovo 1 MHz, musíme na ich identifikáciu použiť koherentný zdroj svetla so šírkou čiary pod 1 MHz.

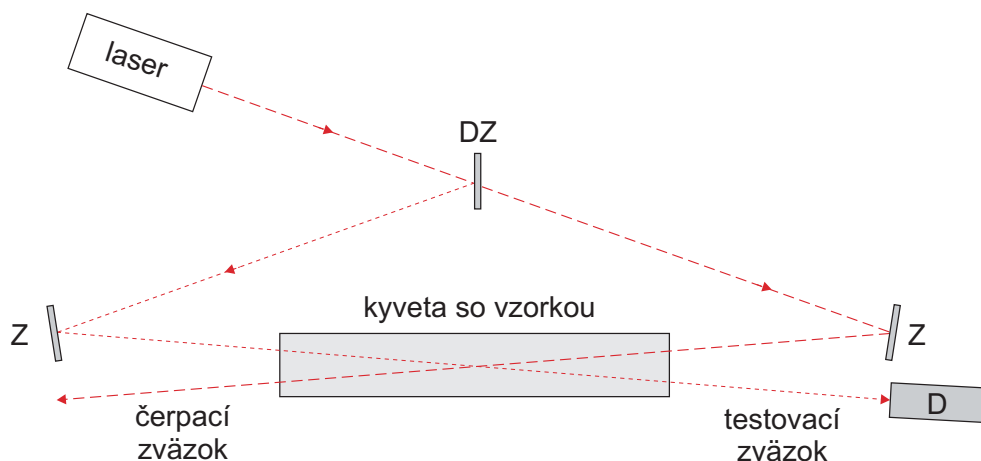
Potlačovanie Dopplerovho rozšírenia

Jednou z najdôležitejších predností, ktoré jednomódové lasery poskytujú v oblasti spektroskopie s vysokým rozlíšením, je možnosť dostať sa za hranicu danú Dopplerovým rozšírením. Molekuly absorpčného prostredia sa pohybujú tepelnými rýchlosťami, čo znamená že absorpčné čiary plynného či kvapalného média budú rozšírené v dôsledku tohto pohybu [9]. To súčasne s Dopplerovým posunom frekvencie svetla spôsobí excitáciu ďalších molekúl pri ich osvetlení zväzkom takejto frekvencie (v závislosti od smeru pohybu a hodnoty rýchlosti každej molekuly absorpčného prostredia).

V spektroskopii s vysokým rozlíšením existuje niekoľko metód, ktoré dokážu potlačiť Dopplerov posun frekvencie lasera i rozšírenie absorpčnej čiary. Napríklad *bezDopplerovská spektroskopia pomocou prekríženého atómového zväzku* [10] využíva priesečník laserového a atómového zväzku pod pravým uhlom. To znamená, že len atómy so zložkou rýchlosti blízko nule, vzhľadom k smeru šírenia svetla, prispievajú k absorpcii na frekvencii lasera. Takto bude laserovým zväzkom vzbudený len jeden hyperjemný prechod.

Modernejšia metóda, *saturačná absorpčná spektroskopia* [11, 12, 13], je založená na nasýtení určitého hyperjemného prechodu pozorovanej vzorky. Základné usporiadanie tohto experimentu je schématicky znázornené na obrázku 1. Preladiteľný laserový zväzok je rozdelený na jeden intenzívny, takzvaný *čerpací zväzok*, ktorý zabezpečí dostatočný stupeň nasýtenia vybraného prechodu, a menej intenzívny *testovací zväzok*, ktorého intenzitu meriame v závislosti od frekvencie. Hustota obsadenia absorpčnej hladiny značne poklesne po prechode čerpaceho zväzku. Testovací zväzok je dostatočne málo intenzívny, aby nezapríčinil ďalšiu saturáciu a dosahuje maximálnu intenzitu na absorpčnej frekvencii [14]. Na úplnú elimináciu Dopplerovho pozadia sa využíva čerpací a testovací zväzok v protichodnom smere, v praxi sa však ukazuje ako vhodnejšie nechať zväzky pretínať pod malým uhlom. Pre zväčšenie intenzity detekovaného zväzku, čerpací lúč je pravidelne mechanicky prerušovaný. Pri jeho prerušení sa uvoľní cesta cez absorpčné prostredie pre testovací zväzok a detektor zaznamená nárast intenzity. Absorpcia testovacieho

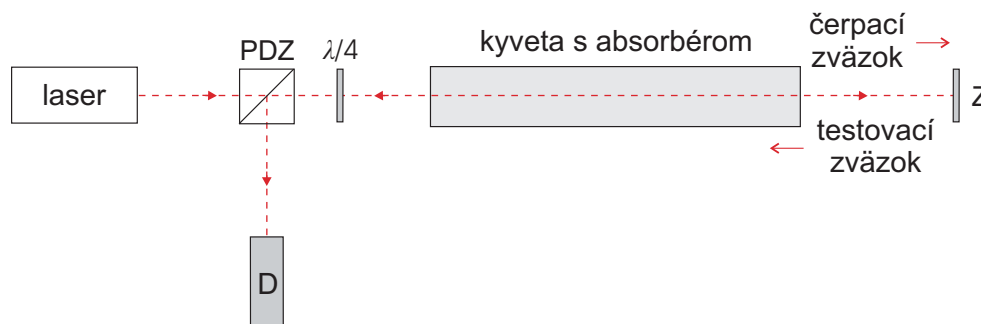
zvážku striedavo rastie a klesá, preto je potrebné detekovaný zväzok amplitúdovo modulovať frekvenciou prerušovania čerpaceho zväzku [15].



Obr. 1: Saturačná absorpčná spektroskopia; DZ - delič zväzku, Z - zrkadlo, D - detektor

Podobná metóda odstraňujúca malé fluktuácie intenzity prekrývajúce signál je použitie dvoch testovacích zväzkov, ktoré sú vyvážené v amplitúde aj fáze (usporiadanie ako Jaminov interferometer) [15].

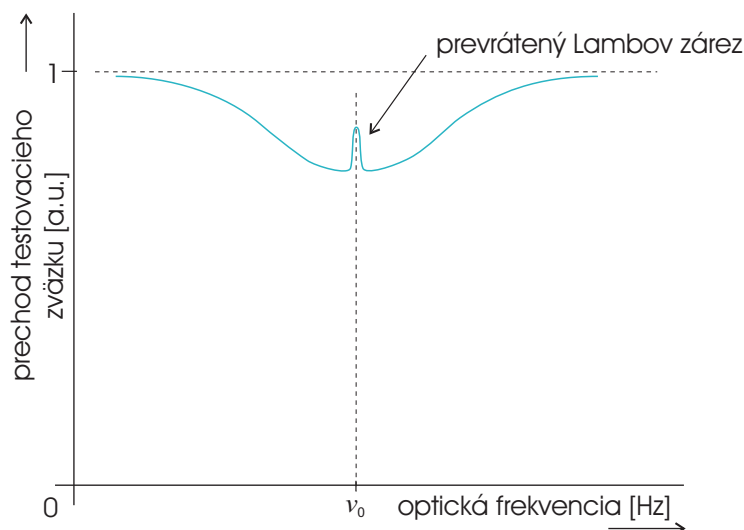
Ak máme v usporiadaní k dispozícii dva laserové zdroje, hovoríme o metóde *vypal'ovania dier* (z anglického *hole burning*). Tzv. *Bennetovo lokálne minimum* (*Bennet hole*) zaznamenáme, ak saturačný čerpací zväzok udržujeme na frekvencii, ktorá vytvorí lokálne minimum v rozdelení častíc podľa rýchlosti a frekvenciu testovacieho zväzku prelad'ujeme cez absorpčný profil [14].



Obr. 2: Spektroskopia v Lambovom záreze s dvomi protichodne sa šíracimi zväzkami rovnakej intenzity; PDZ - polarizačný delič zväzku, Z - zrkadlo, D - detektor, $\lambda/4$ - štvrt'vlnová doštička

Ak sú čerpací a testovací zväzok generované jedným laserovým zdrojom a prechádzajúci zväzok je odrazený späť do absorpčného prostredia - tzv. *in-line spektroskopia* (obr. 2), zaznamenáme *Lambovo zárez* (*Lamb dip*) [14]. V dôsledku opačných Dopplerových posunov, dve vlny rovnakej frekvencie šíriace sa vzájomne opačným smerom vytvoria dve lokálne minimá v rozdelení častíc podľa obsadenosti hladiny. Pri frekvencii lasera zhodnej s absorpčnou frekvenciou sú obe vlny absorbované tými istými molekulami, ktoré sa pohybujú kolmo voči smeru

šírenia zväzkov. Intenzita na absorbovanú molekulu je teraz dvojnásobná a nasýtenie adekvátne vyššie [14]. Príklad spektra nasýtenej absorpcie s jedným hyperjemným prechodom, prevrátený Lambov zárez, je znázornený na obrázku 3.



Obr. 3: Dopplerovsky rozšírený hyperjemný prechod s prevráteným Lambovým zárezom na absorpčnej frekvencii ν_0

V usporiadaní na obrázku 2 je laserom generovaný zväzok lineárne polarizovaný a prechádza polarizačným deličom. Štvrt'vlnová doštička vytvára kruhovú polarizáciu a zrkadlo odráža kruhovo polarizované svetlo s opačným smerom rotácie vektora elektrického poľa. Štvrt'vlnová doštička opäť mení kruhovo polarizované svetlo na lineárne polarizované, ale v smere kolmom na rovinu polarizácie čerpaceho zväzku. Takto sa testovací zväzok odráža na detektor. Spomínané usporiadanie (obr. 2) má dve výhody - využitie celej dĺžky absorpčného prostredia na proces absorpcie a zužitkovanie celého výkonu zväzku najskôr na proces nasýtenia a potom pri transformácii na testovací zväzok.

Metódy detekovania spektrálnych čiar

Pri preladovaní frekvencie lasera cez absorpčnú čiaru pozorujeme, že intenzitný profil obsahuje okrem prevráteného Lambovho zárezu aj Dopplerovské pozadie (obr. 3). Okrem tepelného pohybu spôsobujúceho tento posun v rezonančných frekvenciách existujú ďalšie procesy prispievajúce k zhoršeniu stability a presnosti optického oscilátora. Napríklad zrážky medzi časticami (atómami a molekulami) sú zdrojom posunu frekvencie a rozšírenia čiary. Poruchy v elektronických meracích zariadeniach ako aj rušivé elektromagnetické polia môžu vnášať potenciálne chyby a skresľovať výsledok.

V praxi majú stabilita ako aj presnosť svoje hranice. Atómy (molekuly) absorbujú alebo emitujú energiu v malom okolí rezonančnej frekvencie ν_0 , nie v ν_0 samotnej. Pri zachovaní

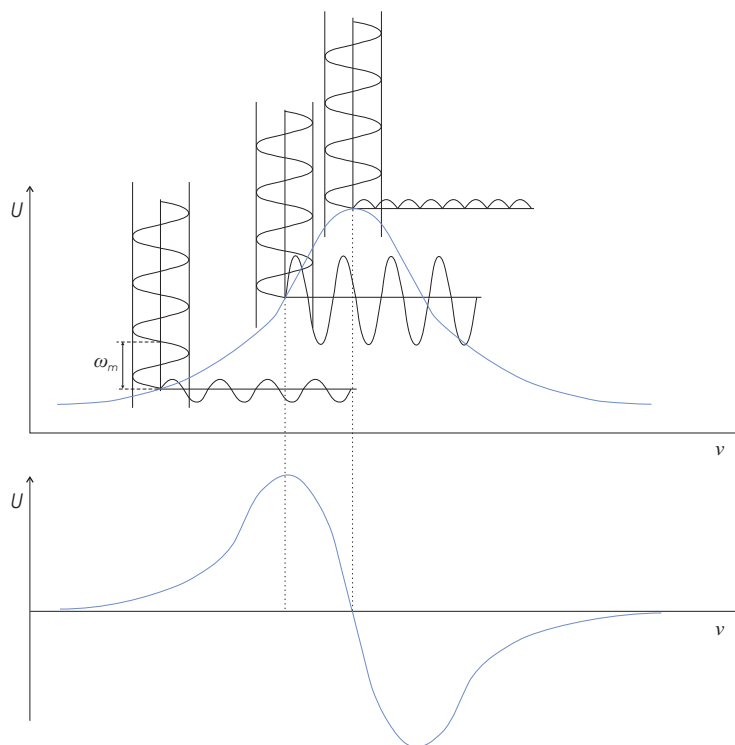
ostatných parametrov, stabilita je priamo úmerná ν_0 a nepriamo úmerná šírke čiary $\Delta\nu$ absorpčnej frekvencie. Vyjadrené zlomkovou frekvenčnou nestabilitou bude zápis vyzerat' nasledovne

$$\sigma \propto \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{S/N} \quad (1)$$

kde S/N je pomer signál - šum a vyššia stabilita je ekvivalentná malým hodnotám σ [16]. Táto nestabilita klesá s nárastom pomeru S/N , s ktorým meriame absorpčný signál, a stabilita tiež rastie pri vyšších frekvenciách s prechodmi s malou šírkou čiary. V skutočnosti kvalita optického oscilátora nezávisí od oscilujúcej frekvencie a pomer $\Delta\nu/\nu_0$ zostáva konštantný pre oscilátory rovnakej kvality.

Cieľmi existujúcich detekčných metód sú eliminácia pozadia a zlepšenie kontrastu pri detekovaní hyperjemných prechodov.

Neskoršie metódy, založené na frekvenčnej modulácii zdroja, sú *spektroskopia s moduláciou vlnovej dĺžky* (WMS) a *spektroskopia s moduláciou frekvencie* (FMS).



Obr. 4: Modulovaný signál a jeho derivácia po demodulácii fázovo citlivým detektorom

Spektroskopia s moduláciou vlnovej dĺžky (WMS)

WMS je najčastejšie využívanou metódou na zlepšenie citlivosti absorpcie, kde modulačná frekvencia $\omega_m = 2\pi f_m$ je oveľa menšia ako šírka absorpčnej čiary. Moduláciu laserovej frekvencie v veľkosti kilohertzov (obr. 4 hore) môžeme vyjadriť nasledovne

$$v(t) = v_0 + m \sin(\omega_m t) \quad (2)$$

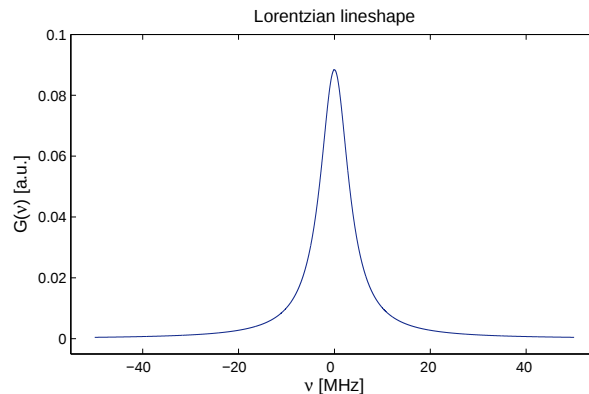
kde modulačný index m reprezentuje (v zmysle polšírok frekvencie) maximálnu odchýlku od nosnej frekvencie v_0 . Index m pri ω označuje modulačnú frekvenciu a nesúvisí s modulačným indexom m .

Ak $G(v)$ je Lorentzovský spektrálny profil (obr. 5) absorpčnej čiary jódu $^{127}\text{I}_2$ s polšírkou (FWHM) Δv_L , potom signál na výstupe detektora bude

$$S(t) = G(v(t)) = G(v_0 + m \sin(\omega_m t)) \quad (3)$$

Signál $S(t)$ môžeme vyjadriť ako sumu charakteristických frekvencií v harmonických ω_m , kde sú sumarizované lineárne kombinácie Chebyshevových polynómov [17]. Tieto harmonické frekvencie sa môžu tiež považovať za derivácie základného signálu $S(t)$ (obr. 4 dole).

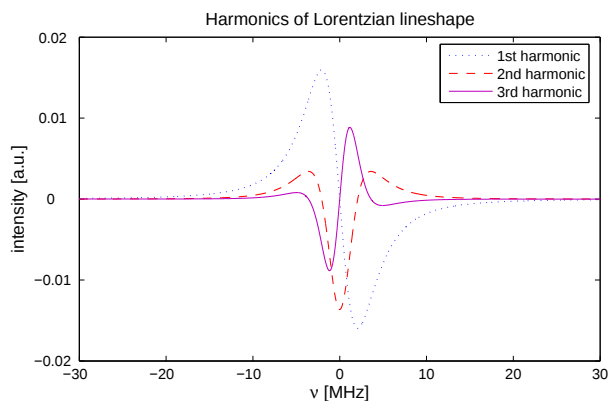
Predpokladajme usporiadanie ako na obrázku 2. Ak frekvenciu lasera modulujeme frekvenciou $f_m = \omega_m/2\pi \approx 1$ kHz a hĺbka modulácie je $m = 3$ MHz, detektor bude merať signál $S(t)$ podľa vzťahu 3. Ak základnú frekvenciu v_0 preladíme postupne pozdĺž profilu čiary (obr. 5), absorpčné prostredie bude pracovať ako nelineárny frekvenčno-amplitúdový diskriminátor a zaznamenávaný bude signál aj s jeho vyššími harmonickými frekvenciami. n -tú harmonickú detekovaného signálu $S(t)$ získame aplikovaním Fourierovej transformácie [18].



Obr. 5: Teoretický tvar spektrálnej čiary hyperjemného prechodu

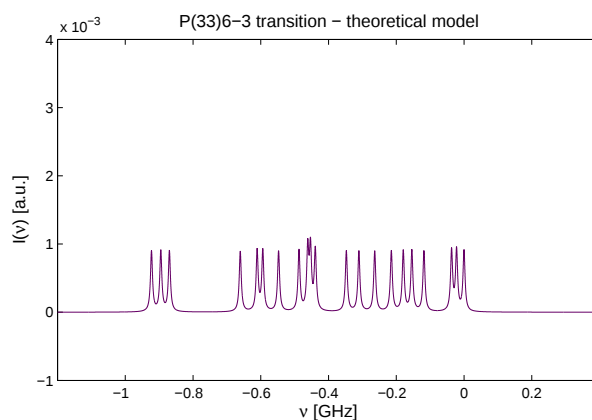
Príkladom teoretického výpočtu pre stupeň harmonickej frekvencie $n \in \langle 1; 3 \rangle$ je obrázok 6. Je viditeľné, že signál každej nepárnej harmonickej má nulový priesečník s osou x v strede profilu čiary, na rozdiel od druhej harmonickej. Detekovanie vyšších harmonických frekvencií signálu $S(t)$ potláča Dopplerovské pozadie vďaka viac ako stonásobne užšej polšírke čiary (FWHM) hyperjemného prechodu Δv_L oproti FWHM čiary s Dopplerovským pozadím Δv_{DB} .

Na obrázku 7 je znázornená hyperjemná štruktúra prechodu P(33)6-3 molekuly jódu $^{127}\text{I}_2$ na $\lambda = 633$ nm s Lorentzovským profilom a šírkou čiary $\Delta v_L \approx 3,6$ MHz, kde jednotlivé frekvencie sú dané odporúčaním smernice *mise en pratique* [8, 19].



Obr. 6: Profily n -tej harmonickej frekvencie Lorentzovskej čiary pre $n \in \{1; 3\}$; $\Delta\nu_L \approx 3,6$ MHz, modulačná frekvencia $f_m = 1$ kHz a hĺbka modulácie $m = 3$ MHz

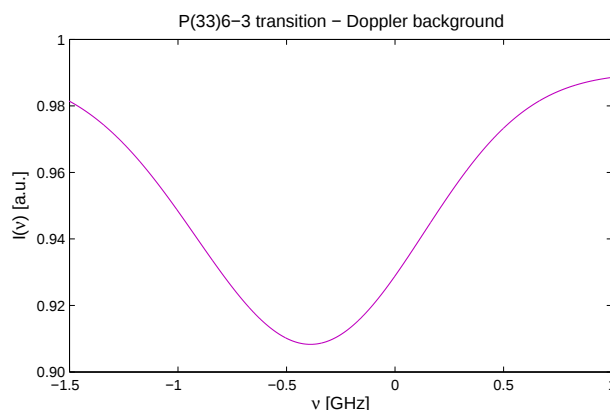
Dopplerovské pozadie (znázornené na obrázku 8) bolo spočítané pre každú z čiar hyperjemnej štruktúry s $\Delta\nu_{DB} \approx 0,5$ GHz. Amplitúdu pozadia sme zvolili približne 500-krát väčšiu ako amplitúdu hyperjemných prechodov.



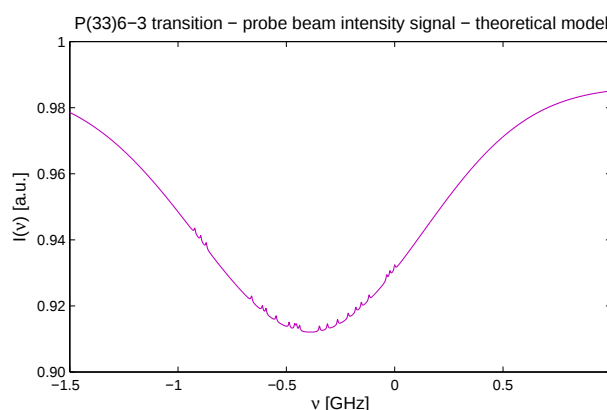
Obr. 7: Čiary hyperjemnej štruktúry bez Dopplerovského pozadia, $\Delta\nu_L \approx 3,6$ MHz

Veľkosť teoretického signálu intenzity na výstupe fotodetektora, ak laser preladujeme pomaly cez rotačno-vibračný prechod P(33)6-3, je znázornený na obrázku 9. Ide o superpozíciu spektrálnych čiar na Dopplerovskom pozadí.

Len signál tretej harmonickej, ktorej Dopplerovské pozadie je dostatočne eliminované, je vhodné aplikovať pri uzamknutí frekvencie lasera. Dôležitá je aj nulová hodnota signálu v strede spektrálnej čiary v tomto prípade (obr. 6), pričom ide aj o všeobecnú požiadavku princípu slučky spätnej väzby.

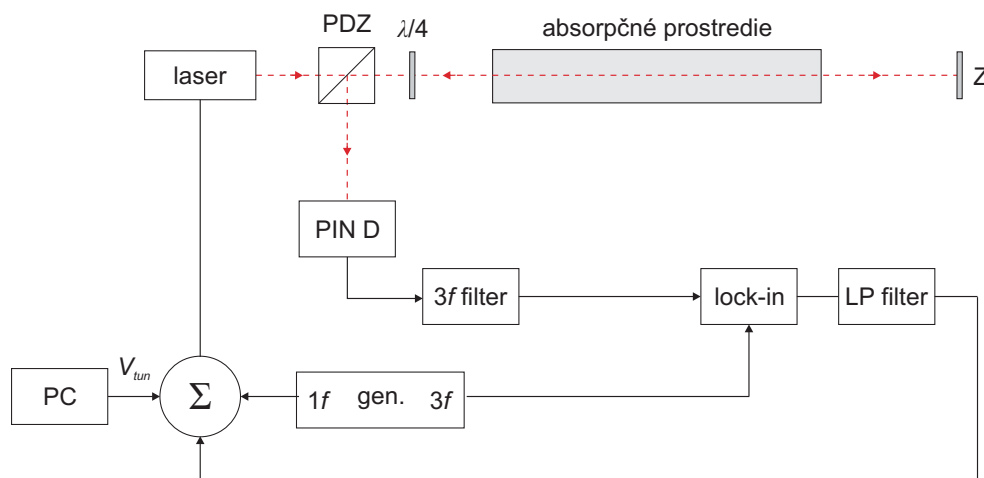


Obr. 8: Superpozícia Dopplerovských pozadí pre všetky čiary hyperjemného prechodu, $\Delta\nu_{DB} \approx 0,5$ GHz



Obr. 9: Superpozícia čiar hyperjemnej štruktúry na Dopplerovskom pozadí

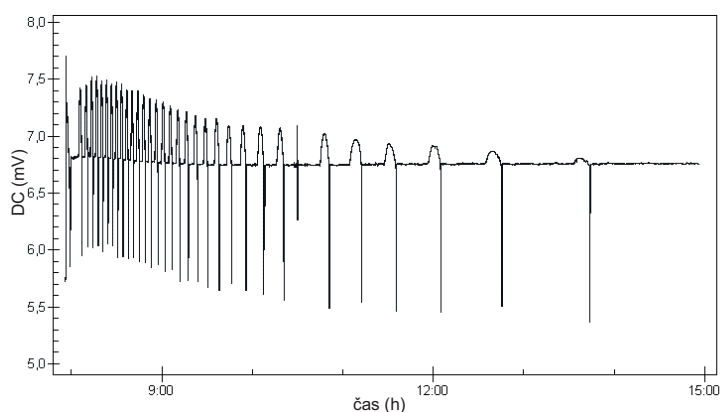
Bloková schéma elektroniky na praktickú realizáciu WMS s detekciou tretej harmonickej je na obrázku 10. Generátor presnej frekvencie $1f$ moduluje frekvenciu lasera sínusovým signálom f_m . Signál $S(t)$ je zaznamenávaný fotodetektorom (PIN diódou) a spracovaný analógovým filtrom s frekvenciou pásma priepustnosti rovnou tretej harmonickej (3234 Hz) modulačného signálu. Fázový detektor porovnáva jeho amplitúdu a fázu so signálom generátora $3f$. Zosilňovač fázového uzamknutia demoduluje signál z PIN diódy, ktorý je f_m -modulovaný, frekvenciou $3f_m$ a tak získavame jeho tretiu deriváciu. Synchronizácia zosilňovača fázového uzamknutia a signálu $S(t)$ sa prevádza digitálnym signálom $3f_m$ generovaným $3f$ generátorom. Dolnopriepustný filter filtruje signál a určuje dynamické vlastnosti slučky spätnej väzby. Ladenie frekvencie lasera je automatizované počítačom a riadiace napätie V_{tun} zabezpečuje pohyb pieza. Relatívna stabilita frekvencie HeNe laserov zamknutých metódou WMS na niektorú z čiar hyperjemného spektra je obvyčajne okolo 10^{-11} , čo bolo dosiahnuté aj na Slovenskom metrologickom ústave [20, 21].



Obr. 10: Bloková schéma WMS s detekciou tretej harmonickej; PDZ - polarizačný delič zväzku, $\lambda/4$ - štvrt'vlnová doštička, Z - zrkadlo, PIN D - PIN dióda, 3f filter - filter pásma priepustnosti, lock-in - zosilňovač fázového uzamknutia, LP filter - dolnopriepustný filter, gen. - generátor presnej frekvencie, V_{tun} - ladiace napätie

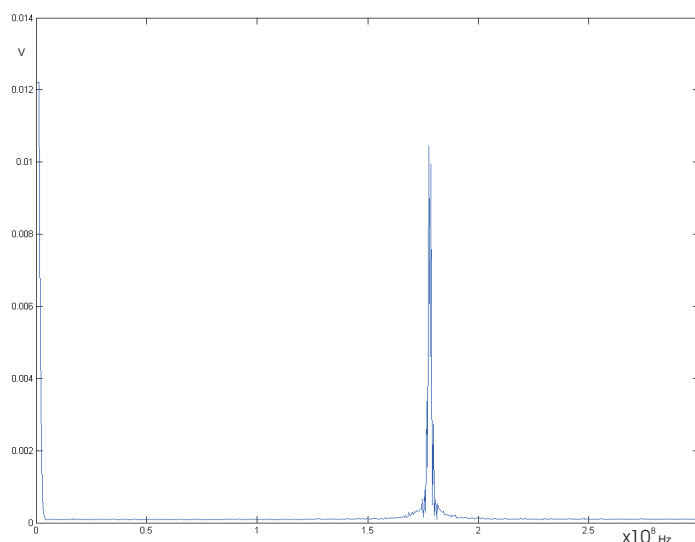
Výsledky

Medzi základné čiastkové výsledky tejto práce patrí niekoľkonásobné justovanie referenčného HeNe lasera SMU 4, ktorého mechanická konštrukcia si to vyžaduje. Počas tejto činnosti došlo k vylepšeniu chladiaceho systému výmenou kadičky s tepelne vodivou pastou, v ktorej bol ponorený prst kyvety, za medený chladič, ktorý je tesne priložený k stene kyvety s absorbným médium. Touto realizáciou je zabezpečený dokonalejší prevod tepla medzi Peltierovým článkom a studeným bodom [22, 23, 24]. Kvôli potrebe stabilného referenčného zdroja sme sa snažili HeNe laser stabilizovať výkonovo (obr. 11). Meraním výstupného optického výkonu sme sledovali jeho teplotnú rozťažnosť.



Obr. 11: Výkonovo stabilizovaný HeNe laser SMU 4

Využívajúc iný stabilný referenčný zdroj (na pracovisku ÚPT Brno) sme vyšetrovali vlastnosti dvoch polovodičových laserov a hľadali ich optimálne parametre využitím metódy záznejov. Nájdenie týchto parametrov dokazuje objavenie záznejov so šírkou čiary (FWHM) 0,5 MHz v prípade diódového lasera v Littman-Metcalfovom usporiadaní (obr. 12).



Obr. 12: ÚPT Brno Littman-Metcalf ECDL s FWHM 0.5 MHz

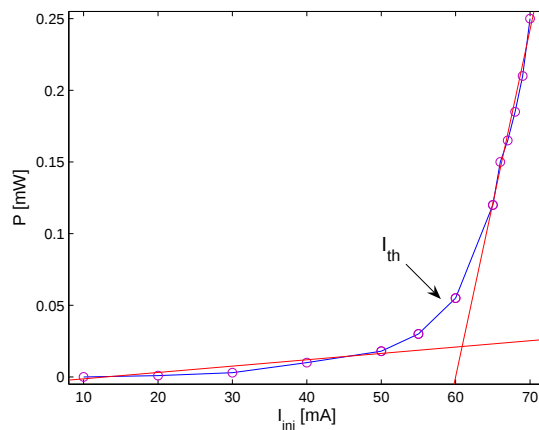
Pre potreby vyhodnocovania stability oscilátorov, čo je v metrologickej praxi často potrebné, sme zostavili softvér na výpočet Allanových variancií, ktorý sme využili na stanovanie stability oboch polovodičových laserov vyšetrovaných na ÚPT Brno. Táto stabilita pred samotným uzamknutím laserov na niektorej z čiar hyperjemnej štruktúry vybraného prechodu sa ukázala byť pomerne vysoká, rádovo 10^{-8} až 10^{-9} , čiže približne rovnaká u oboch vyšetrovaných laserov.

Čiastkovo sme v práci sledovali aj niektoré vlastnosti antireflexne pokrytých laserových diód (napr. hľadanie hodnoty prahového prúdu v závislosti od výstupného výkonu), avšak pre nedostatok vzoriek sa nám podarilo vyšetriť len diódu SAL-0635-10 od firmy Sacher Lasertechnik (obr. 13).

Hlavné prínosy dizertačnej práce

Z dosiahnutých výsledkov je možné formulovať nasledované prínosy:

- použitím inovatívneho prvku v laseri HeNe/I₂ SMU 4 sme zlepšili vlastnosti chladiaceho zariadenia a zabezpečili dokonalejší prevod tepla medzi Peltierovým článkom a studeným bodom kyvety



Obr. 13: Optický výkon veršus injekčný prúd antireflexne pokrytej laserovej diódy typu SAL-0635-10 (Sacher Lasertechnik) (bez vonkajšieho rezonátora)

- využitím technológie výkonovej stabilizácie HeNe/I₂ lasera sme dostatočne stabilizovali frekvenciu lasera, čím sme dosiahli jeho použiteľnosť v menej komplikovaných experimentoch aj napriek zlej mechanickej stabilite zariadenia
- metódou frekvenčných záznejov sme našli optimálne parametre polovodičového lasera v Littman-Metcalfovom usporiadaní a pri FWHM čiary 0,5 MHz sme dosiahli preladiteľnosť okolo 1,5 GHz
- vytvorili sme softvér na vyčíslenie stability oscilátora využitím tórie Allanových variancií využiteľný v metrologickej praxi
- dosiahli sme stabilitu polovodičových laserov TEC 100 a ÚPT Brno s hodnotou $1 \cdot 10^{-8}$ až $5 \cdot 10^{-9}$ pre 1000 s záznam pred uzamknutím metódou WMS
- metódou merania závislosti injekčného prúdu od výstupného výkonu diódy sme overili poškodenie antireflexnej vrstvy u laserovej diódy SAL-0635-10, čo poukazuje na obmedzené použitie polovodičových laserov v praxi
- výpočtom diferenčnej účinnosti diódy sme vyčíslili stupeň jej poškodenia

Literatúra

- [1] Suzuki T., Endo T., Iwana T., Sasaki O.: A tunable external cavity laser diode possessing a stable wavelength, *Optical Review*, vol. 14, no. 1, 23-28, 2007
- [2] Tiziani H. J., Franze B., Haible P.: Wavelength-shift speckle interferometry for absolute profilometry using a mode-hop free external cavity diode laser, *Journal of Modern Optics*, vol. 44, 1485-1496, 1997
- [3] Rovera G. D., Ducos F., Zondy J-J., Acef O., Wallerand J-P., Knight J. C., Russell P. St. J.: Absolute frequency measurement of an I₂ stabilized Nd:YAG optical frequency standard, *Measurement Science and Technology*, vol. 13, 918 - 922, 2002
- [4] Holzwarth R., Zimmermann M., Udem T., Hänsch T. W.: Optical Clockworks and the Measurement of Laser Frequencies With a Mode-Locked Frequency Comb, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 12, 1493 - 1501, 2001
- [5] Cundiff S. T., Ye J.: Colloquium: Femtosecond optical frequency combs, *Reviews of modern physics*, vol. 75, 325 - 342, 2003
- [6] Kubina P. et al.: Long term comparison of two fiber based frequency comb systems, *Optics express*, vol. 13, no. 3, 904 - 909, 2005
- [7] Zarka A. et al.: International comparison of eight semiconductor lasers stabilized on ¹²⁷I₂ at $\lambda = 633$ nm, *Metrologia*, vol. 37, no. 4, 329-339, 2000
- [8] Quinn T. J.: Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001), *Metrologia*, vol. 40, 103-133, 2003
- [9] Fíra R., Navrátil V.: Stabilizácia frekvencie laserov na metrologické účely pomocou nasýtenej absorpcie, *Metrológia a skúšobníctvo*, 1-2, 20-24, 1999
- [10] Jacquinet P.: *High Resolution Laser Spectroscopy*, Springer-Verlag Berlin, 1996 (1st Edition)
- [11] Simonsen H. R., Zarka A.: Iodine-stabilized extended-cavity diode lasers at $\lambda \approx 633$ nm: results of international comparison, *Metrologia*, vol. 35, 197 - 202, 1998
- [12] Lazar J., Číp O., Jedlička P., Růžička B.: Extended cavity semiconductor lasers in fundamental metrology, *Proceedings of SPIE*, vol. 4900, 132 - 138, 2002

- [13] Lazar J., Číp O., Jedlička P.: Tunable extended-cavity diode laser stabilized on iodine at $\lambda = 633$ nm, *Applied Optics*, vol. 39, no. 18, 3085 - 3088, 2000
- [14] Guttenová J.: Optical frequency stabilization of diode lasers, Project of dissertation, Bratislava, 2006
- [15] Schawlow A. L.: *Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules*, Science, vol. 202, 141 - 147, 1978
- [16] Diddams S. A., Bergquist J. C., Jefferts S. R., Oates C. W.: Standards of Time and Frequency at the Outset of the 21st Century, *Science*, vol. 306, 1318 - 1324, 2004
- [17] Arndt R.: Analytical Line Shapes for Lorentzian Signals Broadened by Modulation, *Journal of Applied Physics*, vol. 36, no. 8, 2522 - 2524, 1965
- [18] Číp O.: Frequency stabilization of laser diodes and high-precision laser interferometry, Ph.D. thesis, Brno, 2001
- [19] Felder R.: Practical realization of the definition of the metre (2003), including recommended radiations of other optical frequency standards, *Metrologia*, vol. 42, 323 - 325, 2005
- [20] Chartier J. M., Navrátil V. et al.: International Comparison of Iodine-stabilized Helium-Neon Lasers 633 nm Involving Seven Laboratories, *Metrologia*, vol. 28, 19 - 25, 1991
- [21] Navratil V. et al.: International comparison of He-Ne lasers. Part III: Second comparison of Eastern European lasers, *Metrologia*, vol. 35, 799 - 806, 1998
- [22] Navratil V., Ševčík R.: Realizácia etalónu dĺžky, nový spôsob chladenia studeného bodu jódovej kyvety, *Metrológia a skúšobníctvo*, vol. 2, 6 - 9, 2006
- [23] Guttenová, J. Ševčík, R.: Primary Length Standard Adjustment, *Proceedings of Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics*, Liberec, Czech Republic, 11-15 September 2006, p.66
- [24] Ševčík R., Guttenová J.: Primary length standard adjustment, *Proceedings of SPIE*, vol. 6609, 66090Q-1 - 66090Q-4, 2007
- [25] <http://www.sacher-laser.com/littrow.php>
- [26] <http://www.sacher-laser.com/littman.php>
- [27] Bartl, J. Guttenová, J. Jacko, V. Ševčík, R.: Circuits for Optical Frequency Stabilization of Metrological Lasers, *Measurement Science Review*, vol. 7, sect. 3, no. 4, 59 - 62, 2007

Publikácie

- Ján Bartl, Jana Guttenová, Vlado Jacko, Robert Ševčík. *Stabilizácia optickej frekvencie laserov*. Akceptované v Metrológia a skúšobníctvo, 2008.
- Ján Bartl, Jana Guttenová, Vlado Jacko, Robert Ševčík. *Circuits for Optical Frequency Stabilization of Metrological Lasers*. Measurement Science Review, Vol. 7, Sect. 3, No. 4, p. 59 - 62, 2007.
- Ján Bartl, Jana Guttenová, Vlado Jacko, Robert Ševčík. *Circuits for Optical Frequency Stabilization of Metrological Lasers*. In proceedings of Measurement 2007, Smolenice, Slovakia, May 20 - 24, 2007, p. 131 - 134, 2007.
- Jana Guttenová. *Vyšetrovanie laserových zväzkov mechanickými skanovacími zariadeniami alebo CCD kamerou*. Metrológia a skúšobníctvo, Vol. 4, p. 4 - 11, 2005.
- Jana Guttenová. *Analýza priečneho profilu laserového zväzku transformovaného šošovkou*. Jemná mechanika a optika, Vol. 3, p. 76 - 79, 2005.
- Jana Guttenová. *Laser beam scanning by mechanical principle or by CCD camera*. In proceedings of Mechanical Engineering 2004, Bratislava, Slovakia, 8 September 2004, p. S2-36, 2004.

Postery

- Robert Ševčík, Jana Guttenová. *Primary length standard adjustment*. Proceedings of SPIE, Vol. 6609, 66090Q-1 - 66090Q-4, 2007.
- Jana Guttenová, Robert Ševčík. *Primary Length Standard Adjustment*. In proceedings of Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, Liberec, Czech Republic, 11-15 September 2006, p. 66, 2006.
- Jana Guttenová, Pavel Vojtek. *Laser Beam Scanning by Mechanical Devices and CCD Camera*. In proceedings of SPIE, Nitra, 13 - 17 September 2004, Vol. 5945, 59451B-1 - 59451B-8, 2004.
- Jana Guttenová. *Laser beam scanning by mechanical principle or by CCD camera*. In proceedings of Wave and Quantum Aspect of Contemporary Optics, Nitra, Slovakia, 13 - 17 September 2004, p. 49, 2004.

Resume

The aim of this work was to explore the possibility of introduction and the topicality of tunable semiconductor lasers working at 633 nm in fundamental metrology. However, the use of extended cavity diode lasers is much more wide-ranging. It is e.g. in the field of spectroscopy and optical process control, Raman spectroscopy, THz pulses generation, optical cooling and trapping, BEC, absolute distance interferometry, laser and OPO seeding, nonlinear optical processes or characterizing of fiber optical systems. The use of single-mode light sources with narrow linewidth in telecommunications and bio-medical applications is also significant.

For this purpose we decided to test lasers with extended cavity from Sacher Lasertechnik Group, which promised moderate mode-hop free tuning range, high output power and narrow linewidth. In the case of Littrow Lynx TEC 100 ECDL the producer states the linewidth < 1 MHz [25]. For Littman-Metcalf Lion TEC 500 ECDL it is even < 300 kHz [26]. However, we never achieved such a good results. As for commercially obtained lasers with external cavity, we did not test the diodes themselves and came out from Sacher-laser datasheet. In practice, we found out, that both systems are sensitive to impulse voltage changes and temperature changes of the environment. The location of the cooling system in both devices is not suitable for laser operation in non-air-conditioned laboratory. The model designed in ISI Brno, where the laser diode is directly cooled by Peltier element is suiting these conditions.

Degradation of diode SAL-0635-10 we observed through the output power decrease and noticeable linewidth broadening (beat frequency measurement). This presumption was confirmed after measuring of the optical power vs. the injection current and the differential efficiency calculation, which was about 2%. This result determined the differential efficiency at the level of LED. The result of the measurement refers to AR-coating damage.

The electronics described in this work was proposed for the use of WMS with third harmonic detection [27]. This method eliminates the Doppler background of spectral line during its detection. The setup was upgraded with the automatic laser frequency tuning by microcontroller ADuC 841, which is plugged into the computer.

HeNe/I₂ laser, SMU 4 model, used as reference source of 633 nm, needed also some improvement. Mechanical construction of the laser needed often time-consuming readjustments because of the power decrease. The cooling unit was improved by the exchange of thermal grease for the copper cooler, which ensured better manipulation during adjusting the system and more effective heat transfer [23, 22]. Frequency stability was achieved by the use of optical power stabilization method.

We used the method of beat frequency measurement to find the optimal parameters of diode laser. In the case of Littrow ECDL from Sacher Lasertechnik Group we achieved the linewidth of 5 MHz. The results attained with ISI Brno Littman-Metcalf ECDL reached the linewidth of 0.5 MHz. This value is sufficient to apply the WMS method with third harmonics detection.

The stability of Littrow TEC 100 laser and ISI Brno Littman-Metcalf laser was evaluated by use of Allan variances method. This stability was around 1×10^{-8} to 5×10^{-9} for 1000 s record, which is the Allan deviation before frequency stabilization on chosen iodine hyperfine transition components.

All obtained information point out, that the aim of this work was fulfilled by handling chosen stabilization methods of semiconductor lasers and the goals arranged in thesis too. This intentions came out from preconditions followed from results of international frequency comparison of new types of semiconductor lasers, which proved the fact that alternative coherent light sources based on laser diodes will play an important role in fundamental metrology. In spite of new tendency in length metrology and spectroscopy, the following research in stabilization of semiconductor lasers can represent the preconditions of femtosecond comb or Nd:YAG lasers research in Slovakia.