

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 521

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Bohdan Růžička

Normál vlnové délky
pro optické komunikace
v pásmu C

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

Ing. Bohdan Růžička

**NORMÁL VLNOVÉ DÉLKY PRO OPTICKÉ KOMUNIKACE
V PÁSMU C**

WAVELENGTH STANDARD FOR OPTICAL COMMUNICATION IN
C BAND

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

Obor: Elektronika a sdělovací technika
Školitel: Prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
Oponenti: Prof. Ing. Čestmír Vlček, CSc.
Prof. RNDr. Pavel Tománek, CSc.
Datum obhajoby: 28. března 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

frekvenční stabilizace, absorpční spektroskopie, FM spektroskopie, acetylen

KEYWORDS

frequency stabilization, absorption spectroscopy, FM spectroscopy, acetylene

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

© Bohdan Růžička, 2009

ISBN 978-80-214-3849-1

ISSN 1213-4198

OBSAH

Obsah	3
1 ÚVOD	5
1.1 Cíle disertační práce	6
2 SPEKTROSKOPIE.....	6
2.1 Absorpční spektroskopie	6
2.2 Molekula plynu jako reference	7
2.3 Acetylen	8
2.4 Saturovaná absorpční spektroskopie	8
2.5 Detekční metody ve spektroskopii	9
2.6 Zdroje laserového záření	10
3 KONSTRUKCE ECL LASERU	11
3.1 Mechanický návrh	11
3.2 AR vrstva	12
3.3 Měření reziduální reflektivity	13
3.4 Proudový zdroj	14
3.5 Teplotní kontroler	16
4 LASER, MODULÁTOR, KYVETY	16
4.1 Kyvety	16
4.2 Zdroj laserového záření	17
4.3 Modul DFB laseru	18
4.3.1 Konstrukce elektrické a mechanické chrany laseru	18
4.4 Skenovací F-P interferometr a elektro-optický modulátor	18
4.5 Optovláknové komponenty	19
4.6 Stabilizace s lineární absorpční spektroskopií	20
4.6.1 Derivační spektroskopie realizovaná digitálně	20
4.7 Saturovaná spektroskopie	21
ZÁVĚR	26
Použitá literatura	27
Vlastní publikace	30
Curriculum Vitae	31
Abstract	32

1 ÚVOD

Z hlediska nárůstu přenosové kapacity optických komunikačních systémů má dobrou budoucnost hustě vlnově dělený multiplex (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing). DWDM systémy používají zdroje záření o standardizovaných vlnových délkách, které jsou modulovány příslušným datovým signálem. Aby tyto systémy mohly správně fungovat a nedocházelo k přeslechům mezi kanály, je třeba zajistit přesné a stabilní naladění vysílačích laserů (úzkopásmové přeladitelné lasery) na frekvence stanovené normou. Pro naladění těchto generátorů optických kmitočtů se využívá komerčních vlnoměrů a optických spektrálních analyzátorů. Výrobci těchto zařízení pro oblast infračervených kmitočtů, která je u DWDM využívána, udávají nejistotu až 0,0003 nm (stabilita $1 \cdot 10^{-7}$ rel.). Pro jejich kalibraci je třeba použít etalon s řádově vyšší přesností. Jako optických etalonů frekvence se využívá laserů stabilizovaných na spektrální absorpční čáry plynů, které jsou doporučeny komisí CIPM (Comité International des Poids et Mesures), mezinárodního úřadu pro míry a váhy BIPM v Paříži [24], [25].

Současné optické normály jsou realizovány na principu jednofrekvenčních laserů vázaných na optické nelinearity, které jsou způsobeny hyperjemnými přechody v saturovatelných absorbérech. Takové systémy umožňují dosáhnout vysoké stability frekvence řádu až 10^{-12} . Na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, se kterým FEKT VUT v Brně dlouhodobě spolupracuje, byl vyvinut systém optického frekvenčního normálu v oblasti 633 nm využívajícího ke své stabilizaci saturované absorpce v parách jódu [23]. Výběrem vhodného absorpčního média a laseru lze tuto techniku použít k vytvoření optického frekvenčního etalonu i na vlnových délkách v blízké infračervené oblasti.

Jako zdroje laserového záření se pro tyto účely používají především polovodičové lasery, jejichž výhodou je jejich kompaktnost a snadná dostupnost v široké škále vlnových délek. Stabilita frekvence polovodičových laserů je značně závislá na stabilitě napájecího proudu, provozní teplotě a typu laseru. Fluktuace hlavních provozních veličin je nutné co nejvíce minimalizovat použitím vhodného napájecího zdroje a termostatické laseru. Laserová dioda, jež tvoří hlavní součást polovodičového laseru, je velmi citlivá na účinky statické elektřiny a EMC rušení. Její kvalitní stínění a galvanická izolace signálových vodičů od napájecích nejsou zbytečnou komplikací.

V České republice dosud nebyl k dispozici dostatečně přesný frekvenční etalon vhodný pro kalibraci vlnoměrů a spektrálních analyzátorů pro DWDM optické komunikace. Kalibrace těchto přístrojů v zahraničí je nejen finančně, ale i časově náročná. Současný stav si tedy žádá výzkum a vývoj normálu pro toto pásmo optických kmitočtů. Úspěšné vytvoření takového etalonu se může stát stimulem pro vývoj i případnou výrobu DWDM prvků a systémů. Předpokládaná stabilita a nejistota frekvence vytvořeného zdroje by měla dostačovat i pro další možné aplikace, například v interferometrii.

1.1 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je provést návrh a vývoj zdroje záření se stabilizovanou optickou frekvencí, který by se mohl stát základem etalonu vlnových délek České republiky pro optické telekomunikační pásmo C (1530 – 1565 nm). Je potřeba nalézt vhodný přeladitelný zdroj laserového záření, stabilizovat jeho optickou frekvenci na vyhovující kvantový přechod pomocí spektroskopických technik a ověřit metrologické charakteristiky stabilizovaného systému.

Členění jednotlivých kapitol koresponduje s postupem řešení. Text disertační práce je rozdělen do pěti hlavních kapitol. Úvodní kapitoly popisují teoretické pozadí problematiky stabilizovaných zdrojů koherentního záření. V dalších kapitolách se zabývám návrhem celého stabilizačního řetězce i jeho jednotlivých komponentů. Následují kapitoly popisující experimentální práci při získávání poznatků a ověřování teoretických návrhů.

Úvodní část disertační práce seznamuje se současným stavem a popisuje motivaci pro stanovení hlavního cíle.

Ve druhé kapitole je proveden stručný teoretický rozbor fyzikální podstaty absorpčního jevu a vzniku absorpčních spektrálních čar. Jsou zde popsány důvody, které mě vedly k výběru izotopicky čistého acetyleny $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ jako absorpčního plynu. V této kapitole se zabývám popisem detekčních spektroskopických metod. Rozsáhlá část této kapitoly je také věnována polovodičovým zdrojům laserového záření a jejich klíčovým parametrům z hlediska spektroskopických technik.

Třetí kapitola se zabývá návrhem a realizací polovodičového laseru s prodlouženým rezonátorem. Jsou zde zmíněny i důvody, které byly příčinou změny koncepce zdroje koherentního záření. Následuje také popis konstrukce proudového a teplotního kontroleru. Zařízení jsou na vysoké technické úrovni a zajišťují optimální parametry pro provoz polovodičových laserů.

Čtvrtá kapitola popisuje návrhy, výrobu a měření důležitých součástí vyvíjeného etalonu pro optické telekomunikační frekvence. Je zde popsána výroba kyvet a jejich měření. Změna koncepce zdroje laserového záření přinesla nutnost volby nového zdroje. Vývoj na trhu s optickými komponenty zpřístupnil polovodičový DFB laser. Bylo však potřeba navrhnout kompatibilní obslužnou elektroniku a ověřit provozní parametry. Popis těchto prací je součástí textu této kapitoly. V závěru je popisován experimentální postup a jeho výsledky při optimalizaci spektroskopické detekční techniky.

2 SPEKTROSKOPIE

2.1 ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE

Energetické hladiny molekuly plynu vznikají jednak následkem potenciální energie elektronů vzhledem k atomovým jádrům a ostatním elektronům, jednak v důsledku molekulárních rotací a vibrací. Vibrační energie je způsobena vibračními pohyby mezi jednotlivými atomy v molekule, rotační energie je důsledkem otáčivých pohybů kolem příslušných os. Potenciální energie elektronů je dána

polohou elektronů na energetických hladinách. Vzhledem k těmto typům energií lze rozdělit absorpční spektrum molekuly plynu na rotační, vibrační a elektronové.

Každá molekula vykonává několik druhů pohybů. Vibrace a rotace molekul se řídí zákony kvantové fyziky, z nichž plyne kvantování vibrační a rotační energie molekuly. Při ozáření molekuly infračerveným zářením o energii rovné energetickému rozdílu dvou vibračních hladin, dojde k absorpci tohoto záření a molekula přejde do vyššího vibračního stavu. Při změně vibračního stavu může dojít i ke změně rotačního stavu, proto se tato spektra označují jako vibračně-rotační. U dvouatomových molekul můžeme získat husté absorpční spektrum ve viditelné oblasti spektra, které vzniká kombinací elektronových, rotačních a vibračních přechodů [6], [10].

2.2 MOLEKULA PLYNU JAKO REFERENCE

Molekuly plynu mají spektra bohatá na absorpční čáry související s elektronovými a rotačně-vibračními přechody. Nicméně téměř všechny elektronové absorpční čáry molekul, kromě I₂ a několika málo dalších, mají vlnovou délku ležící v ultrafialové oblasti spektra. Tyto vlnové délky jsou však již tak krátké, že se k frekvenční stabilizaci laserů příliš nepoužívají. Jako referencí pro stabilizaci optické frekvence laserů se využívají rotačně-vibrační absorpční čáry o vlnových délkách v oblasti 0,4 – 10 μm. Tato oblast zahrnuje také pásma určená pro optické komunikace (tabulka 2-1). Absorpční čáry pro tuto oblast vlnových délek jsou vytvářeny rotačně-vibračním pohybem molekul tvořených chemickými vazbami např. vodíku (O-H, C-H a N-H) nebo uhlíku (C-C, C-O). V telekomunikacích se používají standardní frekvence se vzájemným odstupem 100 GHz nebo 50 GHz, které tvoří síť vlnových délek, tzv. síť ITU (International Telecommunication Union), Mezinárodní telekomunikační unie.

Tabulka 2-1 Značení pásem pro optické komunikace

telekomunikační pásmo	rozsah vlnových délek [nm]
O	1290 – 1360
E	1360 – 1460
S	1460 – 1530
C	1530 – 1565
L	1565 – 1625

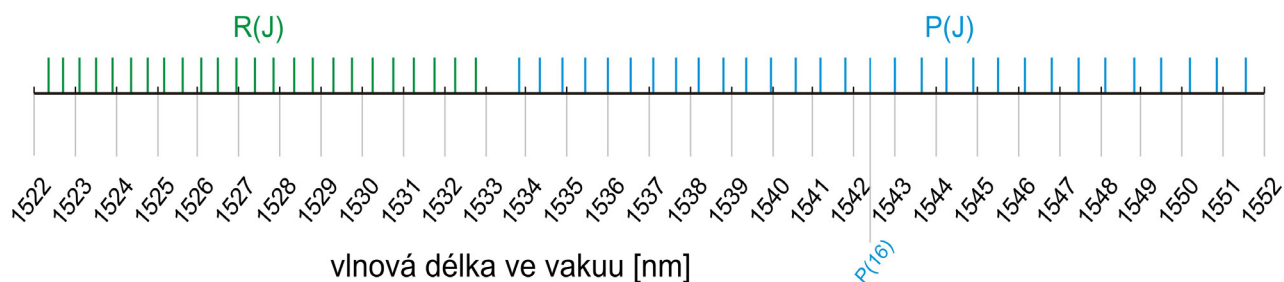
Podstatou metod využívaných ke stabilizaci optické frekvence laseru materiálových referencí je absorpce záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně-vibračních energetických stavů molekuly absorbentu v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie na vlnové délce dopadajícího záření.

Frekvenčně stabilizované lasery slouží jako etalony optických frekvencí a vlnových délek. Aby mohl být etalon oficiálně uznán, musí být dodrženy podmínky plynoucí z doporučení vydávaných Úřadem pro míry a váhy v Paříži, BIPM. Poradní výbor této mezinárodní instituce vydal v roce 2003 doporučení vztahující se k frekvenční stabilizaci optických frekvencí v oblasti 1,5 μm . Podle tohoto dokumentu se ke stabilizaci využívá absorpce laserového záření v parách izotopicky čistého acetyleny $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ na přechodu P(16) $\{\nu_1+\nu_3\}$,

2.3 ACETYLEN

Molekula acetyleny C_2H_2 je lineární. Patří do skupiny D_∞ , protože je středově symetrická. Acetylen má sedm vibračních modů ($3N-5$), ale pouze pět z nich má různé frekvence. Z této tabulky je dále patrné, že mody ν_1 a ν_3 mohou způsobit změnu dipólového momentu molekuly, a proto vyvolají absorpci v infračervené oblasti spektra. Při změně vibračního stavu lineární molekuly vznikají v rotačně-vibračním spektru tzv. paralelní a kolmá pásma. Paralelní pásma jsou důsledkem kmitavého pohybu dipólového momentu podél osy molekuly, zatímco kolmá pásma vznikají při vibračních pohybech dipólového momentu, které jsou kolmé k ose molekuly.

Molekula acetyleny byla podrobně studována a měřena [5], [8], [19], [21], [22], [26], [28]. Acetylen $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ má v telekomunikačním pásmu 1,5 μm celkem 61 absorpčních čar (obr. 2-1), které jsou značeny P(30) až P(1) a R(0) až R(30). Přechody s lichým číslem vykazují přibližně dvojnásobnou absorpci než přechody se sudým číslem. Absorpční čáry jsou od sebe spektrálně vzdáleny 45 až 85 GHz.



Obr. 2-1 Vlnové délky absorpčních čar acetyleny $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ v blízké infračervené oblasti. Na obrázku je zvýrazněna absorpční čára P(16)

2.4 SATUROVANÁ ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIE

U klasické laserové absorpční spektroskopie je intenzita světla dopadajícího na detektor a šířícího se homogenním absorpčním prostředím závislá na vyzářované intenzitě. Prochází-li světelný paprsek prostředím, které je schopno absorbovat, je intenzita paprsku vstupujícího vyšší než intenzita paprsku prošlého tímto prostředím.

Při dostatečně malém výkonu laseru není hustota populace molekul na absorpční hladině závislá na intenzitě dopadajícího záření a absorbovaný výkon je

úměrný dopadajícímu (lineární spektroskopie). Při nenulové absolutní teplotě však v plynu dochází k chaotickému pohybu částic. Protože objem částic plynu vykazuje normální rozložení rychlostí, je vlivem Dopplerova jevu spektrálně ovlivněn i profil absorpčního koeficientu, což má za následek tzv. dopplerovské rozšíření absorpční čáry. Na šířku čáry mají vliv také jiné mechanismy (např. relaxační doba, srážky molekul, tlak plynu atd.), které však při nízkých tlacích absorpčního plynu v řádu milibarů a při srovnání s dopplerovským rozšířením nejsou ze spektroskopického hlediska příliš významné.

Pro spektroskopii s vysokým rozlišením je žádoucí překonat limity určené dopplerovským rozšířením. Bylo vyvinuto několik technik založených na selektivní saturaci atomárních nebo molekulárních přechodů jednofrekvenčními lasery s úzkou spektrální čarou a dostatečným výkonem.

U těchto technik je spektrální hustota populace molekul na absorpční hladině selektivně snižována optickým čerpáním (saturací), které má za následek nelineární závislost absorbovaného vyzařovaného výkonu na dopadajícím výkonu. Proto jsou tyto techniky označovány jako nelineární spektroskopie (někdy také jako saturační spektroskopie) a zahrnují též metody, které jsou založeny na současné absorpci dvou nebo více fotonů atomárními nebo molekulárními přechody.

Nejefektivnější je technika využívající efekt saturačního Lambova zářezu, která umožňuje elegantní potlačení dopplerovského rozšíření a zvýšení rozlišení o několik řádů.

2.5 DETEKČNÍ METODY VE SPEKTROSKOPII

Pro detekci absorpčních spektrálních čar se využívá různých detekčních technik, které byly vyvinuty pro specifické účely. Jedná se nejen o prosté záznamy spekter, kde je důležité pouze dosáhnout dobrého poměru signál/šum, ale v případě stabilizace frekvence laserů je navíc žádoucí detekovat profil spektrálních čar v diskriminační podobě s průchodem nulou uprostřed spektrální čáry. To je nutné pro odvození regulační veličiny pro smyčku zpětné vazby. Dále je zde požadavek na rychlost odezvy, neboť velká šířka pásma regulátoru umožňuje více redukovat spektrum frekvenčního šumu stabilizovaného laseru a tím zlepšit jeho krátkodobou stabilitu. V praxi se pro tyto účely etablovaly dvě metody, v mnohém příbuzné a obě využívající fázové synchronní demodulace, lišící se především kmitočtem modulačního signálu. Mluvíme o tzv. derivační a frekvenčně-modulační spektroskopii.

Technika derivační spektroskopie mění vlnovou délku laserového světla, které během jedné půl-periody vzorkuje absorpční čáru. Výstupem po detekci je první (příp. třetí) derivace absorpčního spektra s poměrem signál-šum daným rozložením výkonové spektrální hustoty frekvenčního šumu laseru a šířkou pásma filtru za synchronní demodulací.

Derivační i frekvenčně-modulační spektroskopie vytvářejí časově závislý fázový posuv střední optické frekvence laserového světelného zdroje. Ve spektrální oblasti vzniknou postranní pásma, které jsou od nosného kmitočtu frekvenčně vzdáleny

v násobcích modulační frekvence Ω . Obě metody nejsou příliš rozdílné, významně se však liší ve velikosti modulačního indexu β a ve vzdálenosti mezi postranními pásmy.

Derivační spektroskopie používá ve srovnání s FM spektroskopií nižší modulační frekvence, ale větší modulační index β . Potom je postranních pásem mnoho a jsou u sebe frekvenčně blíž. Lze říci, že v případě derivační spektroskopie pohlížíme na frekvenčně modulovaný laserový svazek jako na jednu frekvenci, která se periodicky mění v rytmu modulačního kmitočtu a detekuje absorpční profil. V případě FM spektroskopie je modulační kmitočet srovnatelný s šířkou spektrálního absorpčního profilu a modulační index je blízký jedné, takže spektrum frekvenčně modulovaného laserového svazku zahrnuje nosnou frekvenční složku a dvě, nanejvýš čtyři postranní pásma. Postranní pásma vyšších řádů lze považovat za zanedbatelná.

FM spektroskopie díky vyššímu modulačnímu kmitočtu umožňuje posunout pracovní kmitočtové pásmo nad nebo alespoň blízko kmitočtu zlomu, kdy plápolavý šum se spektrálním profilem $1/f$ klesne pod úroveň bílého kvantového šumu.

2.6 ZDROJE LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

Jako zdroj koherentního záření byly až do devadesátých let využívány různé typy plynových, barvivových a pevnolátkových laserů. Polovodičové lasery začaly být komerčně dostupné až od roku 1988. Postupně začaly v mnoha oblastech vytlačovat dosud používané laserové zdroje. S dalším zlepšováním jejich vlastností se oblast jejich použití stále rozšiřuje. Šířka spektrální čáry polovodičového laseru je však typicky větší než u ostatních laserů, protože k přechodům dochází mezi dvěma energetickými pásy. Ve spektroskopických aplikacích je však vyžadován kvalitní zdroj koherentního záření s co nejužší spektrální čarou a dominantním jedním modelem.

Vývoj nových technologií přinesl možnosti nových konstrukcí a podařilo se dosáhnout spektrálních vlastností srovnatelných s klasickými plynovými lasery. Jedná se především o heterostrukturální lasery, lasery s rozprostřenými Braggovými reflektory (DBR lasery), lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou (DFB lasery), lasery s kvantovými jámami, laserové diody s vertikálním rezonátorem.

Zvláštním případem polovodičových zdrojů laserového záření jsou laserové diody s prodlouženým (někdy též externím) rezonátorem (ECL lasery). Princip činnosti spočívá v nahrazení původního rezonátoru laserové diody rezonátorem s výrazně vyšším činitelem jakosti, což má vliv na dobu života fotonu v rezonátoru a zvětšení energie v rezonátoru. Toto uspořádání umožňuje doplnit rezonátor o vlnově závislý prvek, např. difrakční mřížku, zlepšit selektivitu a dosáhnout jednofrekvenčního provozu. Lasery s prodlouženým rezonátorem jsou široce přeladitelné, jednomodové a dosahují úzké spektrální čáry až pod 1 MHz. Tyto vlastnosti z nich dělají vhodné světelné zdroje pro spektroskopii.

Úspěšnost s jakou se podaří potlačit původní rezonátor tvořený čipem laserové diody, bude mít vliv na vlastnosti výstupního záření. Kvalita antireflexní vrstvy se

projeví především šířkou spektrální čáry generovaného laserového záření a možností přeladění vlnové délky bez modových přeskoků. Vývoji metody vedoucí k získání aktivního prostředí antireflexním povrstvením čipu laserové diody byla z těchto důvodů věnována značná pozornost

3 KONSTRUKCE ECL LASERU

Konstrukce laseru probíhala v rámci projektu stabilizace optické frekvence polovodičového laseru na vlnové délce 633 nm ve viditelné spektrální oblasti. Předpokládal jsem, že tato konstrukce bude použita i pro blízkou infračervenou oblast, budou-li modifikovány některé geometrické parametry a optické prvky.

Jedním z důležitých požadavků na laserový zdroj světla pro spektroskopické aplikace je možnost jeho kontinuálního ladění bez modových přeskoků. Příčinou tohoto nežádoucího jevu může být vnitřní rezonátor tvořený čipem laserové diody, jehož vliv je vůči externímu rezonátoru stále zřetelný. Řešením je jeho dostatečné potlačení nanesením antireflexní vrstvy na fazetu čipu. Výraznějším zdrojem modových přeskoků je špatná synchronizace ladění délky rezonátoru a selektivity mřížky. Vzniká tak, že se mody rezonátoru frekvenčně posouvají se změnou délky rezonátoru vzhledem k frekvenci selektované difrakční mřížkou. Z tohoto důvodu je nutné, aby se při ladění vlnové délky ECL laseru měnil úhel, který svírá ladicí zrcadlo a difrakční mřížka, s ním synchronně i délka rezonátoru.

V Littmanově uspořádání ECL laseru se ladicí zrcadlo se otáčí podle středu, který leží v rovině difrakční mřížky. Poloha tohoto čepu je důležitým parametrem, určující přesnost výše zmíněné synchronizace a má vliv na velikost přeladění ECL laseru bez modových přeskoků. Při vhodném umístění čepu je možné kontinuálního ladění dosáhnout pouze naklápěním ladicího zrcadla. Tato problematika byla podrobně diskutována v [11], [13], [15], [16], [17], [27]. Je zřejmé, že přesné mechanické uložení čepu tak, aby nemohlo dojít k jeho posuvu při přeladování vlnové délky, je spolu s robustností a stabilitou rezonátoru jádrem návrhu ECL laseru.

3.1 MECHANICKÝ NÁVRH

Naše konstrukce laseru s prodlouženým rezonátorem je svou tuhostí srovnatelná s lasery se zafixovanou polohou stavěcích šroubů seřizovacího mechanismu čepu (bodu otočení ladicího zrcadla). Pro kontinuální ladění vlnové délky v malém rozsahu využíváme piezokeramický měnič řízený napětím. K přeladění přes celý rozsah emisního spektra laserové diody je možné využít šroub se závitem s jemným stoupáním. Vlastní tělo rezonátoru ECL laseru je vyfrézováno z jednoho kusu duralu a ostatní komponenty jsou jím zakryty. Toto řešení potlačuje vliv akustických vibrací na dostatečně nízkou úroveň a není potom nutné dodatečné krytí.

Teplota laserové diody je stabilizována Peltierovým článkem s rozlišením na úrovni jednotek milikelvinu. Tepelná roztažnost jednotlivých komponentů laseru po dosažení tepelné rovnováhy (asi po pěti minutách) nezpůsobuje problémy.

Správný návrh a seřízení polohy čepu však nestačí k tomu, aby laser pracoval v optimálním režimu. V průběhu realizace konstrukce ECL laseru se ukázalo, že k optimálnímu provozu je nutné nastavení úrovně optické zpětné vazby, kterou je možné ovlivnit rotací pouzdra laserové diody vzhledem k tělesu držáku a měnit tak polarizaci záření dopadajícího na difrakční mřížku.

Měřil jsem účinnost prvního řádu použité holografické difrakční mřížky a také vliv nastavení úhlu polarizace na výstupní výkon generovaného laserového záření. Bylo obtížné dosáhnout určité úrovně opakovatelnosti měření, protože ECL laser je velmi citlivý na jakýkoliv mechanický zásah a bylo nutné jej po každém pootočení pouzdra laserové diody znovu adjustovat. Lze říci, že nejlepších výsledků jsem dosáhl při úhlu polarizace na difrakční mřížku dopadajícího záření asi kolem 45° . Při takovém nastavení ECL laser vykazoval při ladění minimální tendenci k modovým přeskokům a nestabilitám. Toto nastavení však neodpovídá maximálnímu výkonu výstupního záření. Optimalizace úrovně optické zpětné vazby má tak dva póly: buď je možné optimalizovat s ohledem na výkon výstupního světla nebo na možnost co nejširšího přeladění bez modových přeskoků [33], [41], [47].

3.2 AR VRSTVA

Pro získání širokospektrálního aktivního prostředí, které by bylo možné využít pro konstrukci laseru s externím rezonátorem, byly využity komerčně dostupné laserové diody. Tyto součástky jsou pak v takových systémech využívány pouze jako vysoce ziskové aktivní prostředí. Zbytková odrazivost fazet, hran polovodičového čipu, které vytváří u laserových diod rezonátor, je hlavní příčinou změn charakteristiky optického zisku. Je také limitujícím faktorem rozsahu přeladitelnosti ECL laseru a úrovně frekvenčního šumu. Žádoucí nízké odrazivosti fazet se dosahuje kvalitním antireflexním povrstvením.

Tradiční technologie tvorby jednoduchých, příp. dvojvrstevných antireflexí na bázi $\lambda/4$ vrstev, je závislá na precizním určení indexu lomu povrstvovaného materiálu. V případě úzkých aktivních kanálů polovodičových laserů bez bočního vymezení aktivní oblasti (gain-guided) nebo se skokově vymezenou aktivní oblastí (index-guided) není index lomu určen pouze materiálem, ale i geometrií vlnovodu, jeho zakončením a okolními vrstvami.

Nejjednodušší antireflexní povrch je tvořen jednou $\lambda/4$ vrstvou. Jako vyhovující materiál byl použit SiO_2 , TiO_2 (byl testován i ZrO_2). Jedinou možností, jak mít vliv na index lomu v malém rozsahu, je volba tloušťky nanášené vrstvy. Při nanášení vrstev například na běžné sklo se substrát zahřívá až na teplotu 300°C , aby se zlepšila adheze a transparentnost nanášené vrstvy. Čip laserové diody by však při takové teplotě mohl být poškozen. Z tohoto důvodu byl použit krystalický křemík, který má podobný index lomu jako povrstvovaný substrát a nanášení tak mohlo probíhat za pokojové teploty

Je samozřejmé, že vývody laserové diody byly zkratovány, aby byl choulostivý čip chráněn před indukovanými proudy, statickou elektřinou a především před elektronovým dělem, které tvoří součást vakuové komory.

K experimentální práci s napařováním antireflexních vrstev a konstrukcí laseru s externím rezonátorem byly použity laserové diody s vlnovou délkou generovaného záření 635 nm. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na dobré vyhlídky využití takového laseru v metrologických aplikacích (hojně používaný plynový HeNe laser generuje záření ve stejné oblasti vlnových délek) a také s ohledem na snadnou manipulaci s viditelným zářením. Nezanedbatelným důvodem této volby byla i nízká cena těchto laserových diod v porovnání s laserovými diodami pro blízkou infračervenou oblast. Aplikace poznatků pro jiné vlnové délky (např. pro vlnové délky v blízké infračervené oblasti) je pak už jenom záležitostí dostupnosti frekvenčně závislých komponentů.

3.3 MĚŘENÍ REZIDUÁLNÍ REFLEKTIVITY

Hlavním cílem nanášení antireflexní vrstvy na fazetu čipu laserové diody je získání aktivního prostředí s velkým ziskem, které by mohlo být zakomponováno do laseru s externím, vysoce jakostním rezonátorem a s vlnově selektivním prvkem umožňující ladění vlnové délky výstupního laserového záření. Limitující pro ladění takového laseru je nebezpečí tvorby modových přeskoků, které vznikají jako důsledek soutěžení modů externího rezonátoru s nedostatečně potlačeným původním rezonátorem laserové diody. Zbytková odrazivost antireflektné laserové diody způsobuje periodickou modulaci výkonového spektrálního profilu výstupního záření superluminiscenční diody vytvořené antireflexním povrstvením a je možné ji využít ke stanovení úrovně antireflexní úpravy fazet [9], [12], [18].

Před vlastním procesem nanášení antireflexní vrstvy byla u každého vzorku změřena světelná a V-A charakteristika, prahový proud, výstupní výkon a šířka spektrální čáry. Dále byl odstraněn kryt pomocí speciálního nástroje a takto upravená součástka byla se zkratovanými vývody umístěna do vakuové komory napařovací aparatury. Po nanášení antireflexních vrstev byla u každé diody opět změřena světelná charakteristika, aby se zjistilo, jak úspěšně se podařilo potlačit vliv původního rezonátoru tvořeného polovodičovým čipem. Metodu napařování antireflexních vrstev se podařilo zvládnout s dobrou reprodukovatelností při dosažení zbytkové odrazivosti kolem $5 \cdot 10^{-5}$. Zjistil jsem, že po procesu nanášení antireflexní vrstvy dochází k posunu vlnové délky vyzařovaného světla (až o 5 nm) směrem ke kratším vlnovým délkám. Tento jev si vysvětluji rozdílnou kvantovou účinností aktivního prostředí při stimulované a spontánní emisi.

~

Podařilo se navrhnout a zkonstruovat kompaktní laser s prodlouženým rezonátorem a s optimalizovanou optickou zpětnou vazbou. Provedl jsem řadu experimentů, které vedly k jejímu nastavení a dosáhl jsem širokého přeladění vlnové délky výstupního laserového záření [30], [31], [32].

V průběhu experimentální práce se ukázalo, že kritickým bodem pro široké přeladění není pouze nastavení optické zpětné vazby a polohy čepu, ale i kvalita antireflexního povrstvení fazety čipu laserové diody. Bohužel antireflexní vrstva mění po čase svoje parametry, lze říci, že její kvalita degraduje. Za půl roku se vlastnosti ECL laseru s instalovanou antireflexně povrstvenou diodou výrazně zhoršily. Začal se projevovat silný vliv původního rezonátoru tvořeného čipem laserové diody, maximální dosažitelný výstupní výkon klesl a zúžilo se pásmo přeladění bez modových přeskoků.

Nepříjemným problémem, který v podstatě ukončil moje snažení na tomto poli byl fakt, že výrobci laserových diod uvedli na trh čipy s pasivovanými fazetami ve snaze zvýšit životnost čipů. Tloušťka pasivační vrstvy není pro tento účel důležitým parametrem a tudíž vykazovala velmi špatnou reprodukovatelnost. Návrh soustavy AR vrstev pro antireflexi materiálu s již deponovanou vrstvou o tloušťce blízké vlnové délce je téměř nemožný. Je potřeba dodat, že snaha o komunikaci s výrobcí a zjištění parametrů pasivačních vrstev byla zcela marná.

3.4 PROUDOVÝ ZDROJ

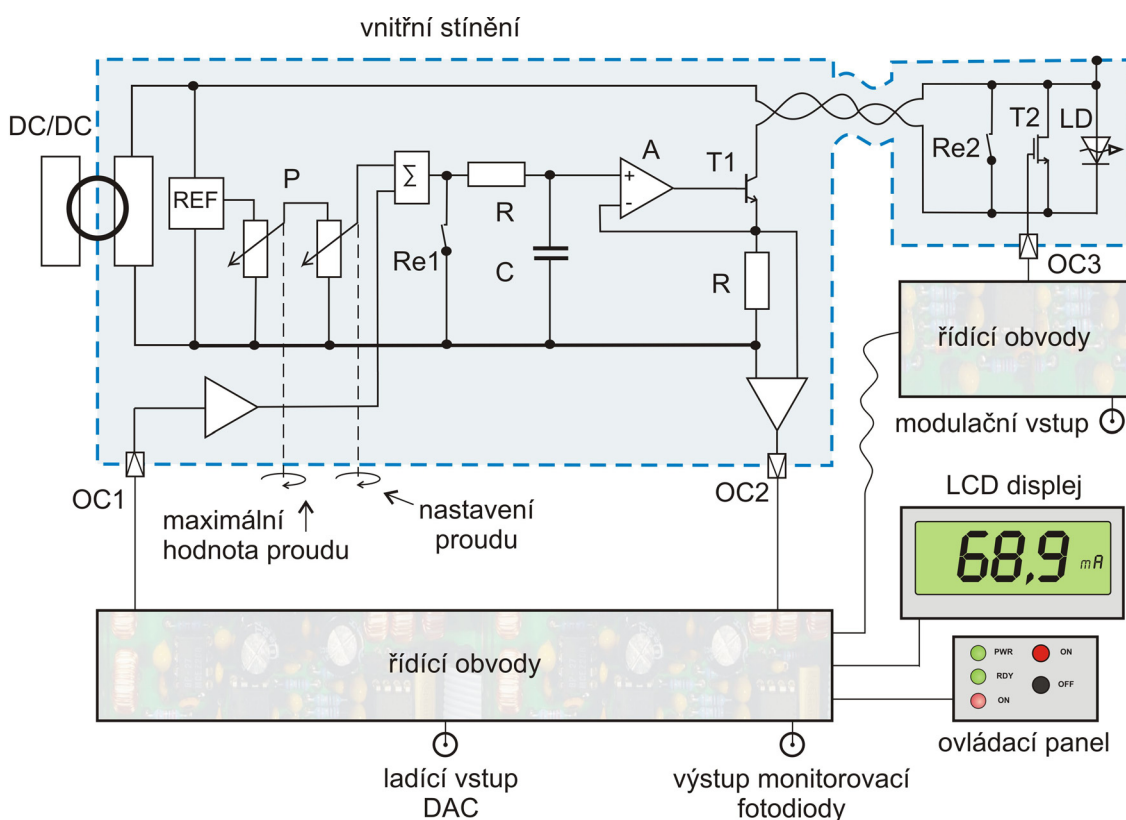
Vlnovou délku vyzařovaného světla laserovou diodou je možné přímo ovlivňovat změnou jejího pracovního proudu. U diod s vloženou selektivní strukturou, jakou jsou diody DBR a DFB, je tento vliv malý, ale přesto dostatečný pro zapojení do zpětné vazby frekvenční stabilizace. Koeficient ladění proudem u použité DFB laserové diody je 0,0015 nm/mA (pro běžné laserové diody s heterostrukturou je tento koeficient 0,07 nm/mA).

Dlouhodobá i krátkodobá stabilita napájecího proudu, ale i kvalitní šumové vlastnosti proudového zdroje, jsou základními předpoklady pro konstrukci frekvenčně stabilizovaných generátorů laserového záření. Laserové diody jsou velice citlivé na poškození způsobené napěťovými špičkami, které se mohou indukovat do přírodních vodičů nebo do obvodů elektroniky kontroleru. Pokud je napájení laserové diody řešeno běžným zdrojem, který postrádá jakékoliv stínění, je značné nebezpečí vzniku destruktivních pulsů i při běžné manipulaci s laserovou hlavou nebo i zapnutím blízkého spotřebiče. Skryté nebezpečí takového poškození spočívá v tom, že nemusí dojít ke zničení diody najednou, ale polovodičový čip laserové diody postupně degraduje, zhoršují se provozní parametry a uživatel tak dlouho nemusí nic pozorovat

Mým cílem bylo zkonstruovat proudový kontroler, který zajistí bezpečný provoz laserové diody. Rozhodl jsem se pro klasické, analogové řešení. Rozhodujícím důvodem byla obava z pronikání rušení vznikajícího v digitálních obvodech. Požadavky na variabilitu provozních parametrů jsou také u proudového kontroleru výrazně nižší a digitální realizace by tak nepřinesla zásadní výhodu.

Proudový kontroler je sestaven z vlastního proudového zdroje, řídicí elektroniky, napájecího zdroje zajišťujícího galvanické oddělení, z ochranných obvodů a modulačních obvodů umístěných těsně u laserové diody.

Aby byla dosažena vysoká odolnost proti indukovaným pulsům, je důležité kvalitní stínění. V návrhu jsou uvažována dvě stínění. Vnější stínění celé sestavy je připojeno na referenční potenciál veškeré ostatní elektroniky. Vnitřní stínění chrání všechny obvody bezprostředně připojené k laserové diodě a je spojeno pouze se společným vývodem laserové diody a s jejím pouzdrem a držákem. Napájení obvodů, které jsou chráněny vnitřním stíněním, se děje pomocí oddělovacího transformátoru. V rané verzi určené pro polovodičové diody vyžadující maximální proud kolem 150 mA byl použit napěťový DC/DC převodník, který však již nemohl dodávat proud pro laserovou diodu DFB s maximálním proudovým požadavkem 250 mA. Veškerá komunikace s těmito obvody se děje pomocí opticky oddělených zesilovačů nebo relé. Laserová dioda a její pomocné ochranné obvody jsou s modulem kontroleru spojeny speciálně vyrobeným kabelem, který má rovněž dvojitě stínění. Navíc hlavní proudový přívod k diodě je řešen krouceným párovým vodičem (viz obr. 3-1).



Obr. 3-1 Blokové schéma proudového kontroleru

V případě neočekávaného výpadku napájecího napětí je napájení proudového zdroje zálohováno elektrolytickými kondenzátory s velkou kapacitou, které zajistí energii na dostatečně dlouhou dobu. Během této doby dojde automaticky k plynulému poklesu proudu diodou až na nulu. Monitorovací fotodiody laserové diody je zapojena pro provoz ve fotovoltaickém režimu. Proud z ní vytváří úbytek na odporu, který je měřen přístrojovým operačním zesilovačem a dále se přenáší pomocí lineárního optočlenu. Na čelním panelu kontroleru je pak k dispozici napětí,

keré je úměrné aktuálnímu výkonu laserové diody. Napětí na proudoměrném odporu je snímáno také přístrojovým operačním zesilovačem a přes lineární optočlen je vedeno na digitální voltmetr na panelu kontroleru.

Řídicí obvody zajišťují zapínání a vypínání laserové diody pomocí vzestupné a sestupné rampy proudu, které jsou spouštěny rampovým relé. Také ovládají ochranné relé a vypínají proud diodou v případě výpadku napájecího napětí. Ochranné relé v modulu diody automaticky zkratuje laserovou diodu vždy, když není v provozu. Tyto obvody jsem se snažil navrhnout co nejjednodušší, sestavené převážně z diskrétních součástek, abych se vyhnul nebezpečí nedefinovatelného chování při klesajícím napájecím napětí při výpadku

Při návrhu tohoto přístroje bylo hlavním cílem vytvořit systém schopný zajistit bezpečný provoz laserové diody i v podmínkách mimo laboratoř. Dalším cílem bylo vyvinout zařízení dostatečně univerzální, které by bylo použitelné pro různé aplikace v oblasti interferometrie a spektroskopie. Nebezpečí zničení laserové diody indukovanými pulsy se mi podařilo konstrukcí tohoto zdroje prakticky odstranit. Těchto kontrolerů bylo vyrobeno více kusů a jsou úspěšně používány v laboratořích na Ústavu přístrojové techniky AVČR [33], [36], [45].

3.5 TEPLOTNÍ KONTROLER

Změnou teploty čipu laserové diody dochází ke změně indexu lomu aktivní vrstvy a současně ke změně mechanických rozměrů vlivem tepelných dilatací [2]. Mění se tak optická dráha a tím se mění i optický kmitočet generovaného světla. Koeficient ladění laserové diody teplotou je typicky 0,08 nm/K. Z toho vyplývá, že teplotní stabilizace je nezbytná pro dosažení stability optického kmitočtu. Návrh teplotního kontroleru byl proveden pod vedením Ing. Ondřeje Čípa, PhD [3].

Pro vlastní regulaci teploty čipu laserové diody je použit Peltièrův článek, k němuž je dioda připevněna společně s teplotním senzorem. Teplotní kontroler umožňuje připojení různých variant pouzder laserových diod. Změnou velikosti stejnosměrného proudu tekoucího Peltièrovým článkem je možné spojitě měnit množství čerpaného tepla a tak řídit teplotu diody. Jako teplotní sensor zde slouží integrované teplotní čidlo AD22100, které obsahuje termistorový snímač a linearizační zesilovač s napěťovým výstupem. Napětí z tohoto senzoru je digitalizováno 16-ti bitovým sigma-delta A/D převodníkem AD7715. Digitalizovaný signál z A/D převodníku je následně přiveden přes sériové synchronní rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface) do řídicího procesoru elektroniky.

4 LASER, MODULÁTOR, KYVETY

4.1 KYVETY

Byly vyrobeny celkem tři typy kyvet plněných absorpčním plynem a určených pro stabilizaci frekvence laseru. Střední část kyvety je tvořena trubicí z křemenného skla. Trubice je na obou koncích uzavřena skleněnými okénky, přes která prochází laserový svazek. Okénka jsou z důvodu snížení optických ztrát a také, kvůli

zamezení zpětným odrazům, z obou stran antireflexně povrstvena a u dvou typů kyvet jsou skloněna pod úhlem asi 1° a u třetího typu kyvety jsou okénka skloněna pod Brewsterovým úhlem odpovídajícím nulovému odrazu. Přibližně uprostřed kyvet vybíhá kolmo do boku skleněná uzavřená trubička. Jedná se o technologické reziduum, které sloužilo ke spojení kyvety a vakuové aparatury. Po naplnění kyvety plynem je tato trubička zatavena. Výrobu kyvet jsem konzultoval s technickým sklářem v ÚPT, p. Richardem Vašíčkem, který má s výrobou kyvet zkušenosti, především pro He-Ne lasery. Ten také všechny kyvety podle mých požadavků vyráběl.

První pokus o výrobu kyvety byl neúspěšný, protože se molekuly acetyleny rozpadly po příliš vysokém zahřátí kyvety při procesu odtavení z vakuové aparatury (na teplotu tavení křemenného skla asi 1800°C). Bylo nutné najít materiál, který má nižší teplotu tavení než křemenné sklo. Vhodným materiálem se ukázalo boritokřemičité sklo s obchodním označením SIMAX, jehož bod měknutí, Littletonův bod, je 820°C . Z tohoto materiálu byl u dalších kyvet vyroben přívod z vakuové aparatury do kyvety přes několikanásobný skleněný přechodový prvek postupně přizpůsobující různé teplotní roztažnosti křemenného skla a boritokřemičitého skla, takže při odtavení kyvety z vakuové aparatury již nedocházelo k přehřátí a spálení acetyleny v kyvetě.

Měřil jsem úroveň absorpce acetyleny $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ na čáře P(16) při teplotě okolí 24°C pro několik tlaků a délek kyvet. Ze změřených hodnot rozdílů prošlého výkonu laseru pro naladění na vrchol absorpční čáry a odladění mimo absorpci pro několik tlaků jsem určil lineární absorpční koeficient $\alpha = 0,0066 \cdot (1 \pm 0,1) \text{ Pa}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Tvar absorpční čáry je gaussovský i při růstu tlaku plynu v kyvetě. Zvyšováním tlaku acetyleny nad 500 Pa je patrná nelinearita závislosti maxima absorpce na tlaku, která není způsobená saturací absorpce, protože se při fokusaci svazku nemění. Nelinearita pravděpodobně vzniká vlivem tlakového rozšíření srovnatelného s dopplerovským rozšířením.

4.2 ZDROJ LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

V kapitole 3 popisují konstrukci laseru s prodlouženým rezonátorem pro oblast vlnových délek 635 nm , který po výměně vlnově závislých prvků může pracovat na vlnové délce 1550 nm . I když se podařilo zkonstruovat laser s výbornými provozními parametry, díky změně obchodní strategie výrobců polovodičových laserových diod nebylo možné získat vhodné aktivní prostředí. V této době se však na trhu začaly objevovat laserové diody pro telekomunikační pásma v blízké infračervené oblasti.

Z poměrně úzkého výběru se mi podařilo vybrat produkt firmy JDS Uniphase, laserovou diodu s DFB strukturou nesoucí označení CQF935-708. Po dohodě s dodavatelem bylo možné zvolit vlnovou délku generovaného laserového záření, kterou jsem stanovil podle doporučení BIPM na $1542,151 \text{ nm}$ (optická frekvence $194,4 \text{ THz}$). Mojí snahou také bylo, aby celá konstrukce etalonu byla robustní a kompaktní s ohledem na její budoucí využití i mimo laboratorní prostředí. Z tohoto

důvodu se provedení pouzdra s navázáním laserového záření do vlákna, které výrobce nabízí, jevílo jako výhodné. Do úvahy o vhodném zdroji laserového záření jsem vzal i plošně vyzařující laserové diody VCSEL, ale dostupné výkony v telekomunikačním pásmu C se pohybovaly jenom kolem 1 mW, což je nedostatečné.

4.3 MODUL DFB LASERU

Laserová dioda s DFB strukturou je součástí hybridního laserového modulu chráněného pouzdrém typu Butterfly. Generované výstupní záření je navázáno do polarizaci zachovávajícího optického vlákna. Pouzdro také obsahuje Peltièrův člunek, termistor, monitorovací fotodiodu, kolimační čočku a optický izolátor, který brání nežádoucím zpětným odrazům do čipu laserové diody. Laserová dioda má šířku spektrální čáry generovaného záření menší než 1 MHz, což je méně než subdopplerovská spektrální šířka absorpční čáry acetyleny při doporučováném tlaku.

Provedl jsem také řadu měření DFB laserové diody. Ověřil jsem, že optickou frekvenci DFB laserové diody je možné naladit na optickou frekvenci, která odpovídá optické frekvenci absorpční čáry P(16).

4.3.1 Konstrukce elektrické a mechanické ochrany laseru

Hybridní pouzdro laserové DFB diody je přišroubováno na masivní hliníkový chladič, který zároveň tvoří oporu pro držák optického vlákna a stíněný plošný spoj ochranné a modulační elektroniky. Tyto elektronické obvody chrání citlivý čip laserové diody před indukovanými napěťovými špičkami a také umožňují bezpečné jemné ladění vlnové délky změnou velikosti injekčního proudu. Obvodové řešení jemného ladění proudem využívá proudového bočníku, takže proud tekoucí do laserové diody nemůže překročit operátorem nastavenou úroveň. Při odpojení proudového kontroleru za provozu nebo při výpadku napájení, elektronická ochrana zkratuje vývody čipu laserové diody. Signál z monitorovací fotodiody je možné odebírat přes lineární optický vazební člen, který je součástí ochranné elektroniky. Modul ochranné elektroniky zajišťuje i propojení pouzdra laserové DFB diody s proudovým a teplotním kontrolérem.

Po stranách bloku chladiče jsou vyfrézovány drážky, aby celá sestava (DFB laser, elektronika, chladič, optické vlákno) mohla být umístěna do standardizované přístrojové skříně (racku). Sestavu doplňuje přístrojový panel, který je přišroubován ke chladiči. Na panel jsou vyvedeny konektory pro spojení modulu s teplotním a proudovým kontrolérem. Výstupní laserové záření je možné odebírat připojením optického vlákna přes optickou spojku.

4.4 SKENOVACÍ F-P INTERFEROMETR A ELEKTRO-OPTICKÝ MODULÁTOR

Spektrální vlastnosti laserového záření je možné pozorovat v malém frekvenčním rozsahu, avšak s vysokým rozlišením, skenovacím F-P rezonátorem v konfokálním

uspořádání s degenerací modů. F-P rezonátor funguje jako optický filtr. Ideálně jím projde jenom záření, na jejíž vlnovou délku je rezonátor naladěn. Pomocí piezoprstence je rezonátor v malém rozsahu přeladován přes profil spektrální čáry vstupujícího laserového záření. Úroveň signálu na fotodetektoru je úměrná úrovni výkonu prošlého záření na příslušné vlnové délce. Proces přeladování je zachycen jako spektrální profil na obrazovce osciloskopu, který pracuje v X-Y režimu.

Skenovací F-P rezonátor byl vyvinut pro vlnové délky v oblasti 633 nm na ÚPT AVČR již v dřívější době Ing. Bohumilem Popelou. Pro účely mé práce bylo potřeba provést výpočty a optimalizaci optických komponent pro vlnové délky v oblasti 1550 nm. Frekvenční rozsah (opakovací kmitočet) skenovacího rezonátoru jsme zvolili 2 GHz. Spektrální rozlišení se pohybuje v řádu MHz. Pomocí tohoto přístroje lze například kvalitativně ohodnotit jednobodový režim polovodičového DFB laseru.

Pro rychlou modulaci optické frekvence laseru byl použit optovláknový elektrooptický fázový modulátor. Technika FM spektroskopie vyžaduje obvykle frekvenční, resp. fázovou, modulaci na frekvencích na úrovni několika MHz i více s minimálním vlivem reziduální amplitudové modulace. Pro tento účel je výhodnější použít právě externí elektro-optický modulátor než modulovat frekvenci laserové diody přímo proudem. Mimo jiné i proto, že je možné oddělit část optického výkonu jako užitečný výstup před modulací.

4.5 OPTOVLÁKNOVÉ KOMPONENTY

Laser s výstupním svazkem vyvázaným do vlákna nabízel možnost realizovat část optické sestavy ve vláknové podobě. Z důvodů jednoduchosti, robustnosti a miniaturizace to bylo lákavé řešení. Jak se postupně ukázalo, bylo to též zdrojem problémů. Pro účely subdopplerovské spektroskopie acetylenu bylo potřeba využít polarizační optiky, takže se jevílo nutné i použití polarizací zachovávajících vláken, aby byla jednoznačně definována polarizační rovina světla na výstupu z vláknové části.

Naše experimenty s tímto vláknem nicméně prokázaly, že reálné vlákno zachovává polarizaci jen částečně. Dochází k pomalým driftům výstupní roviny polarizace v rozsahu několika úhlových stupňů, což má vliv na drift velikosti signálu v detekčním řetězci spektroskopie. Částečné potlačení tohoto efektu na akceptovatelnou úroveň se podařilo až důslednou fixací celé vláknové sestavy na základovou desku experimentu. Je zřetelné, že na změny polarizace ve vlákně má vliv mechanické namáhání vlákna a také teplota okolí.

U všech vláknových optických komponentů byly použity konektory APC, které mají nízký vložný útlum a potlačují nežádoucí zpětné odrazy. Konektory jsou navrženy tak, aby mezi nimi nevznikala vzduchová mezera. Ferule optických konektorů byly sbroušeny na úhel 8° a vyleštěny.

4.6 STABILIZACE S LINEÁRNÍ ABSORPČNÍ SPEKTROSKOPIÍ

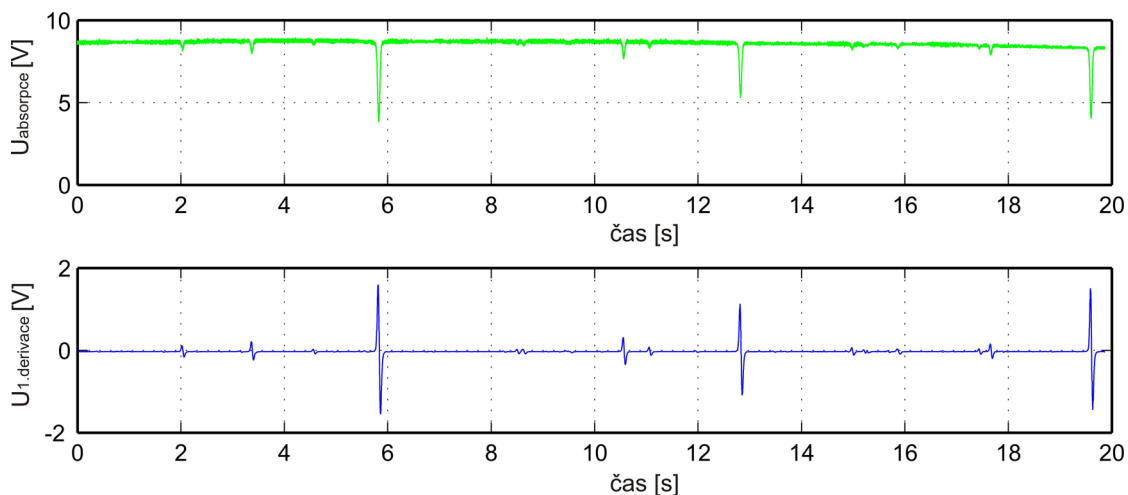
Lineární absorpční spektroskopie je nejjednodušší stabilizační technikou založenou na detekci intenzity záření po jeho průchodu absorpčním prostředím. Detekovaný profil absorpční čáry je dán dopplerovským rozšířením, jedná-li se o plynné prostředí. Stabilita optické frekvence laseru stabilizovaného touto technikou je limitována šířkou čáry, která se pohybuje na úrovni 1 GHz. Náš laser stabilizovaný na dopplerovsky rozšířenou čáru dosahoval relativní stability až úrovně 10^{-8} . Odhad je založen na znalosti velikosti šumu regulační odchyly ve smyčce řízení s ohledem na strmost diskriminační křivky detekované absorpční čáry.

4.6.1 Derivační spektroskopie realizovaná digitálně

Zpětnovazební regulační smyčka stabilizující optickou frekvenci laseru na střed absorpční čáry lze realizovat i digitálně. Využil jsem toho, že kolega z ÚPT AVČR, Ing. Ondřej Číp, PhD., realizoval systém pro stabilizaci optické frekvence polovodičového laseru na jodové absorpční čáry s využitím číslicových obvodů [3], a použil jsem jeho metodu ke stabilizaci optické frekvence DFB laseru na absorpční čáry acetylenu.

K dispozici jsem měl AD/DA modul, který slouží jako vstup i výstup analogových a digitálních signálů. Je postaven na procesoru Motorola DSP 56F805, který již obsahuje 12-ti bitové A/D převodníky. Jako další D/A převodníky jsou k němu přes SPI sběrnici připojeny obvody AD1861 (výrobce Analog Devices) s rozlišením 18 bitů. Vstupy i výstupy mají nastavitelný zisk, aby bylo možné optimálně využít dynamický rozsah převodníků. Modul AD/DA realizuje digitální derivační spektroskopii včetně generace sinusového modulačního signálu (1 kHz), který přes modulační obvody u DFB laserové diody moduluje napájecí proud a tím moduluje optického kmitočtu generovaného laserového záření. Digitální filtrace a také výpočty Fourierovy transformace jsou implementovány v programu procesoru.

Záznam vzorků měřeného signálu probíhá synchronně s referenčním signálem. Při jedné periodě referenčního signálu je měřený signál vzorkován v osmi bodech. Po digitální filtraci následuje decimace vzorků a je vypočtena hodnota reálné a imaginární složky měřeného signálu. Znaménko reálné složky nám říká, na kterou stranu od středu čáry je měřený optický kmitočet posunut. Absolutní hodnota detekovaného signálu odpovídá ve střední části diskriminační křivky odchylce od středu absorpční čáry. Jedná se vlastně o algoritmus jednobodové Fourierovy transformace. Na následujícím obrázku je zobrazen záznam detekce absorpčních spektrálních čar při přeladění optické frekvence záření DFB laseru teplotou.

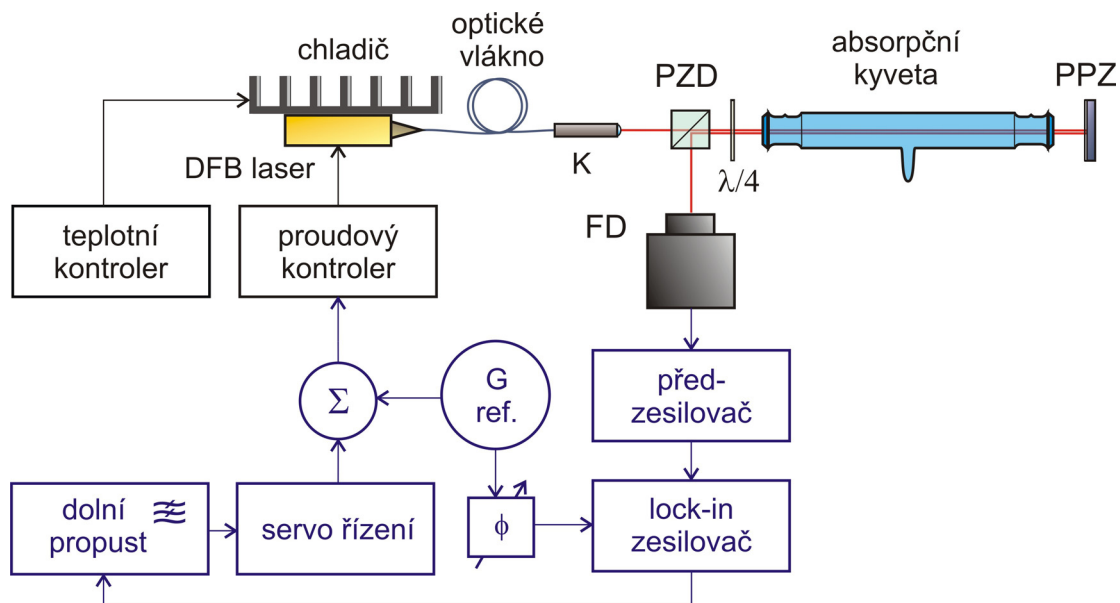


Obr. 4-1 Záznam absorpčního spektra jako signál z fotodetektoru (horní průběh) a jeho první derivate (spodní průběh) při ladění optické frekvence DFB laseru

4.7 SATUROVANÁ SPEKTROSKOPIE

Výsledky stabilizace optické frekvence DFB laseru s využitím technik lineární absorpční spektroskopie jsou dostatečné. Přirozená šířka spektrální čáry acetylenu však umožňuje s použitím příslušných detekčních technik dosáhnout ještě lepší úrovně stability. Dopplerovské rozšíření absorpční čáry je zde limitujícím faktorem, který je nutné překonat pomocí metod, kterým se souhrnně říká saturovaná spektroskopie.

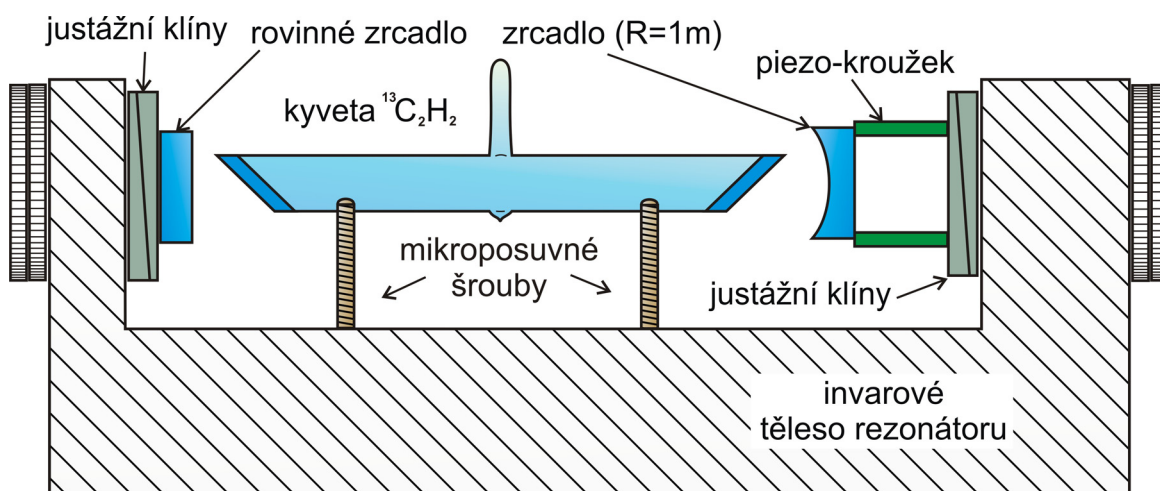
Nejjednodušší spektroskopické uspořádání potlačující dopplerovské pozadí plynného acetylenu $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ je na obrázku 4-2. Kolimované lineárně polarizované laserové záření prochází absorpční kyvetou a pokud je dostatečně intenzivní, dojde k saturaci absorbéru na příslušné vlnové délce. Část svazku šířícího se v tomto směru, tak zvaného čerpacího svazku, je po průchodu kyvetou odražena zrcadlem PPZ a vrací se zpět po stejné dráze absorpční kyvetou. Lineární polarizace svazku je při prvním průchodu čtvrtvlnnou destičkou konvertována na kruhovou, ta při odrazu svazku od zrcadla změní smysl rotace. Po druhém průchodu čtvrtvlnnou destičkou se převede polarizace svazku zase na lineární, ale s rovinou polarizace otočenou o 90° vzhledem k původní rovině polarizace čerpacího svazku. Polarizačně závislý dělič PZD pak tento odražený svazek odkloní na fotodetektor FD. Při naladění optické frekvence laseru na střed dopplerovsky rozšířené čáry acetylenu dochází k detekci saturace absorpce zpětným měřícím svazkem, díky čemuž mohou být detekovány hyperjemné komponenty přechodu molekuly acetylenu bez dopplerovského rozšíření. V této konfiguraci, kde jsem použil dlouhou absorpční kyvetu č.3 s tlakem plynu 5,2 Pa, se mi ovšem nepodařilo detekovat hyperjemnou absorpční čáru vlivem příliš nízkého poměru signál-šum.



Obr. 4-2 Uspořádání eliminující subdopplerovské pozadí (FD – fotodetektor, PZD – polarizačně závislý dělič, $\lambda/4$ – čtvrtvlnná deska, PPZ – polopropustné zrcadlo, Φ – posunovač fáze, G ref.– generátor referenčního signálu 1 kHz, K – kolimátor)

Pokusil jsem se vylepšit šumové vlastnosti soustavy předstabilizací optické frekvence pomocí F-P rezonátoru. Stabilizace na pasivní F-P rezonátor bývá nazývána jako Pound-Dreverova metoda [7]. Využívá detekci rezonanční křivky rezonátoru technikou FM spektroskopie, která umožňuje rychlou zpětnovazební regulaci optické frekvence laseru. Abych se vyhnul nežádoucí amplitudové modulaci, která by vznikla jako důsledek modulace injekčního proudu, použil jsem vláknový elektro-optický fázový modulátor. Tento vláknový elektro-optický modulátor není nutné napájet z výkonových zesilovačů, jako je to nutné v případě modulátorů s velkou aperturou. Tímto odpadají problémy s rušením vznikající na podpůrných napájecích obvodech těchto zařízení (vysokonapěťový a vysokofrekvenční rezonanční transformátor, výkonový zesilovač). Moje sestava obsahuje dva kanály fázově posunuté vůči sobě o 90° , takže demodulace je zde plně kvadrurní. Modulační frekvence 10 MHz umožňuje šířku pásma zpětnovazební smyčky asi 1 MHz. Elektronika systému FM spektroskopie je optimalizována na minimální fázovou nestabilitu. K její konstrukci byly využity moderní vysokofrekvenční operační zesilovače a je také vybavena pásmovými filtry, které zlepšují poměr signálu k šumu.

Navrhl jsem konstrukci F-P rezonátoru s vloženou absorpční kyvetou. Rezonátor o délce 13 cm je vyroben z jednoho kusu Invaru, aby se zajistila co nejlepší teplotní stabilita. Jedno zrcadlo rezonátoru je rovinné a druhé s poloměrem křivosti 1 metr, což zaručuje optickou stabilitu rezonátoru. Sférické zrcadlo je upevněno na piezo-kroužku. Pomocí tohoto elementu je možné rezonátor frekvenčně ladit.



Obr. 4-3 Schéma F-P rezonátoru s vloženou acetylenovou kyvetou

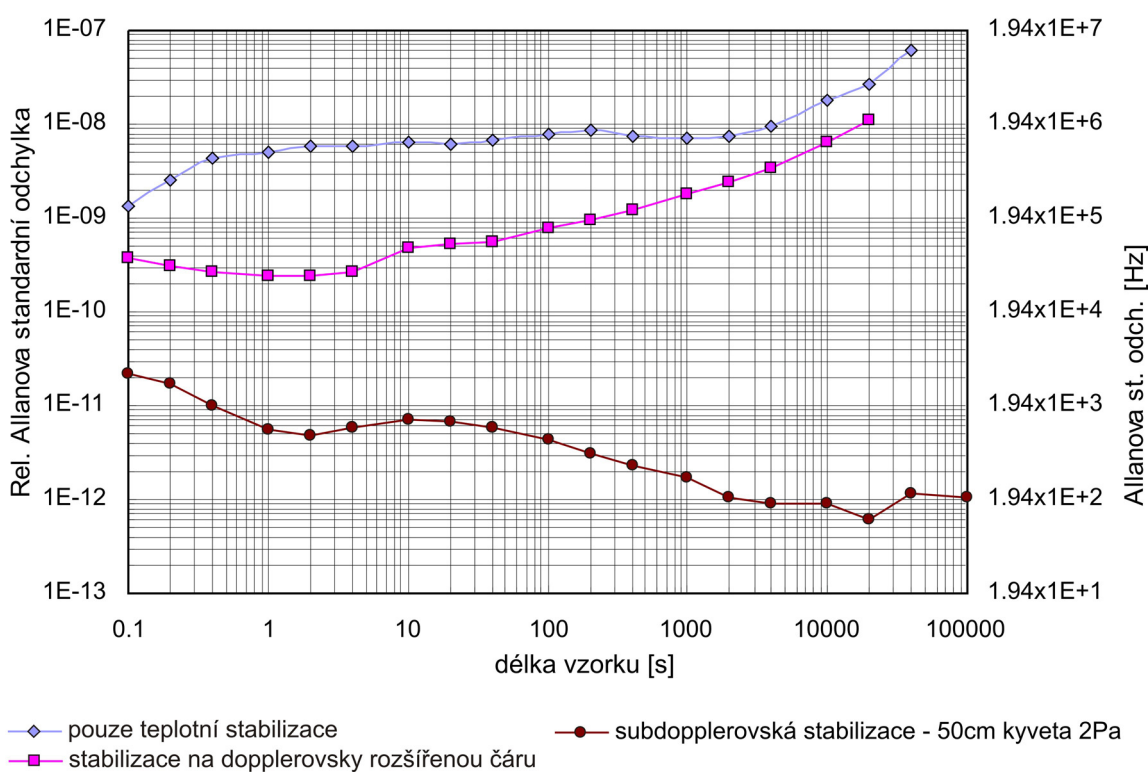
Při experimentech jsem zjistil, že dochází k odrazům záření na výstupu vlákna laseru. Výstupní vlákno vytvářelo dodatečný sekundární rezonátor, a to i přes zabudovaný optický izolátor v pouzdře DFB laserové diody (35 dB dle katalogového listu výrobce). To se projevovalo ve frekvenčních skocích laseru, které byly pozorovatelné využitím skenovacího F-P rezonátoru. Protože se zjevně jednalo o vliv nedokonalého spojení optických polarizací zachovávajících vláken, pokusil jsem se nechat tato vlákna spojit svařením na Ústavu fotoniky a elektroniky AVČR v Praze. Svařování PM vláken je poměrně náročné, protože je potřeba velmi přesně dodržet vzájemné natočení pomalé a rychlé osy spojovaných vláken. Nerozebíratelné spojení PM vláken svařením se však ukázalo jako nefungující. Odrazy na svařených spojích byly stále velmi výrazné a znemožňovaly detekci hyperjemných čar v absorbéru. Nechal jsem tedy všechna vlákna osadit úhlovými konektory APC a podařilo se mi tak dostatečně redukovat tuto rušivou vazbu. Později jsem v odborné literatuře našel doporučení nespojovat svařováním polarizací zachovávající optická vlákna různých typů [29].

Měřit úzké a velmi slabé (tzv. hyperjemné) absorpční čáry při nízkém tlaku plynu v absorpční kyvetě je možné jen prodloužením interakční délky mezi absorbérem a laserovým zářením. Toho lze například dosáhnout víceprůchodovou Herriotovou kyvetou. Tato kyveta je zakončena sférickými zrcadly, jejichž poloměr je jen nepatrně větší než je délka kyvety. Svazek vstupuje do kyvety v jednom bodě a po mnohonásobném průchodu vystupuje ven. Počet průchodů, a tedy i interakční dráhu, je možné regulovat změnou vzdálenosti mezi zrcadly. Lepší řešení však představuje umístění absorpční kyvety do externího Fabryova-Perotova rezonátoru. Interakční délka absorpční kyvety je tak násobena jakostí Q rezonátoru.

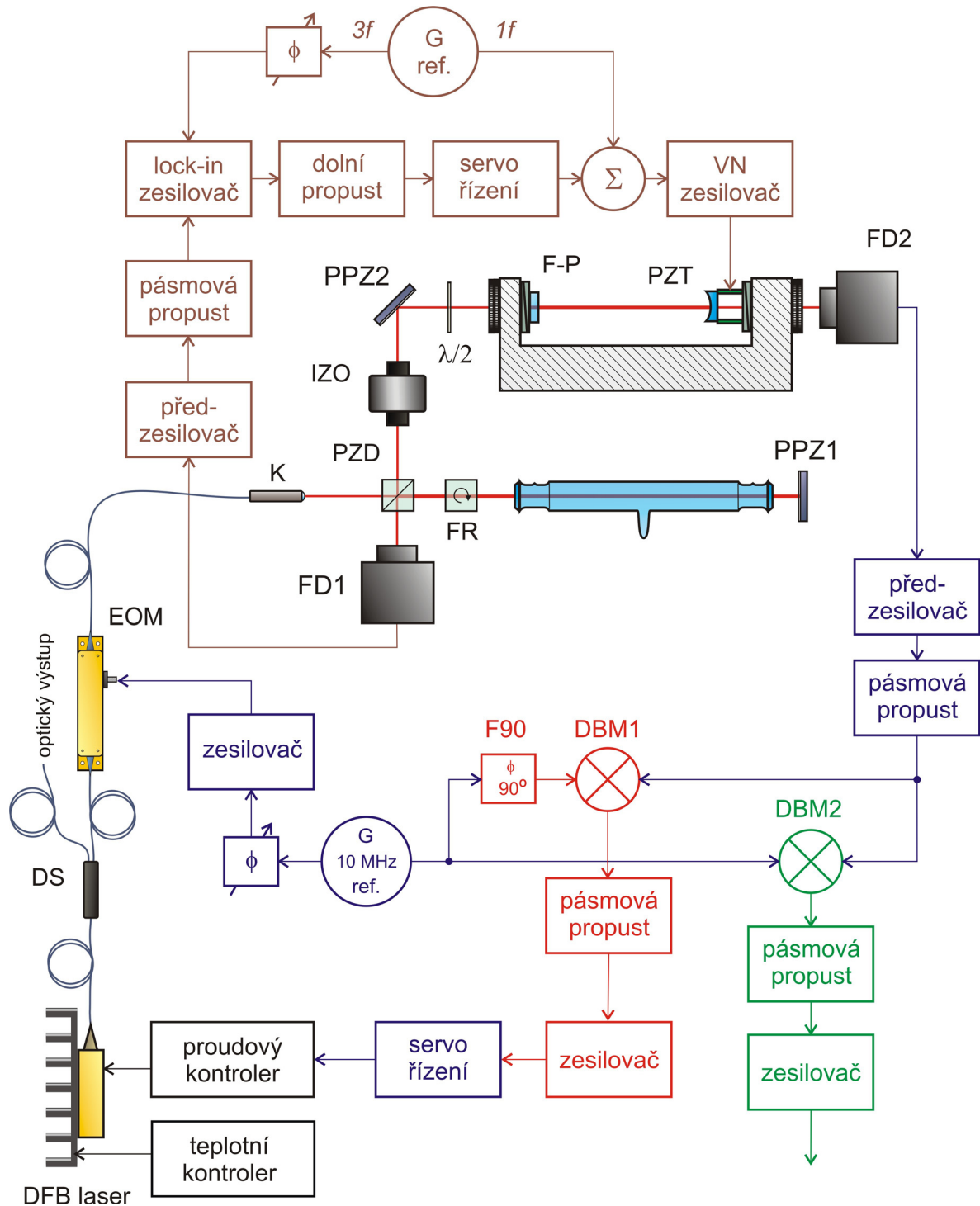
Stabilizace na hyperjemné přechody v acetylenu s kyvetou v rezonátoru vyžaduje dvě regulační smyčky. Záření odražené z rezonátoru vykazuje rezonanční minimum detekované FM technikou a stabilizuje laser na rezonátor rychlou smyčkou zpětné vazby. Derivační spektroskopie s pomalou modulací rezonátoru (1 kHz) detekuje

absorpci v kyvetě a smyčka zpětné vazby stabilizuje modovou frekvenci rezonátoru. Tato konfigurace měla přinést zlepšení šumových poměrů v detekčním systému. Subdopplerovská spektroskopie využívající konfiguraci absorpční kyvety v rezonátoru však nefungovala podle mých odhadů. Frekvenční šum DFB laserové diody se demoduloval na ostrém maximu rezonanční křivky F-P rezonátoru. Vznikl dodatečný šum, který se přičítal k amplitudovému šumu DFB laseru. Signál zpětné vazby z FM demodulátoru byl tak zatížen velkým šumem, který znemožňoval detekci hyperjemných absorpčních čar.

Řešením se ukázalo použít sestavu se dvěma stabilizačními větvemi. Jedna pomalá, která zajišťuje závěs F-P rezonátoru na střed hyperjemné absorpční čáry, druhá smyčka zpětné vazby využívá techniku třetí derivace ke stabilizaci optické frekvence DFB laseru na rezonanční maximum F-P rezonátoru. Podařilo se stanovit stabilitu optické frekvence vyvinutého laserového systému, která dosahuje relativní stability až 10^{-12} [1], [46].



Obr. 4-4 Frekvenční stabilita DFB laseru pouze tepelně stabilizovaného (horní) dále se stabilizací na dopplerovsky rozšířenou čáru (střední) a subdopplerovská stabilizace (spodní). Průběhy byly naměřeny ve spolupráci s Českým metrologickým institutem v Praze



Obr. 4-5 Sestava pro subdopplerovskou stabilizaci optické frekvence DFB laseru na střed hyperjemné absorpční čáry (DS – dělič svazku, EOM – elektro-optický fázový modulátor, K – kolimátor, F-P – Fabryův-Perotův rezonátor, PZT – piezo-kroužek, FD1 a FD2 – fotodetektory, F90 – posunovač fáze o devadesát stupňů, DBM1 a DBM2 – směšovače, Φ – ladění fáze, G 10 MHz ref. – generátor referenčního signálu pro FM (10 MHz), G ref. – generátor referenčního signálu 1 kHz, F90 – posunovač fáze o 90°, FR – Faradayův rotátor, PZD – polarizačně závislý dělič, PPZ1 a PPZ2 – zrcadlo)

ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo navrhnout a sestavit zdroj laserového záření se stabilizovanou optickou frekvencí pro optické telekomunikační pásmo C. Práce byla realizována v Ústavu přístrojové techniky AVČR, některá měření byla provedena v laboratořích Českého metrologického institutu v Praze.

V první části práce jsem se věnoval teoretickému rozboru problematiky absorpční spektroskopie a jejímu využití pro stabilizaci optické frekvence laseru. Dále zde popisují přípravné experimentální práce, výběr vhodného laserové zdroje záření a referenčního kvantového přechodu.

Experimentální část práce popisuje návrh a výrobu pomocných mechanických prvků, absorpčních kyvet s různými tlaky plynu a délkami, elektroniku proudového a teplotního kontroleru a elektroniku uplatňující spektroskopické stabilizační techniky.

Dále byly sestaveny a vyzkoušeny jednoduché spektroskopické experimenty s DFB laserem a proměřeny parametry pro stabilizaci laseru na spektrální čáry acetyleny. Byla vyvinuta elektronika pro radiofrekvenční modulaci optické frekvence laseru pomocí elektrooptického modulátoru a následná detekce spektrálních čar technikou frekvenčně-modulační spektroskopie. Podařilo se subdopplerovsky detekovat spektrální čáru a stabilizovat na ní optickou frekvenci DFB laseru.

Závěrem mohu konstatovat, že cíle mé disertační práce byly splněny. Byla navržena a realizována sestava laseru stabilizovaného na molekulární přechody izotopicky čistého acetyleny. Dosažená stabilita je lepší než 10^{-12} a plně vyhovuje parametrům primárního etalonu vlnové délky podle doporučení CCL. Sestava se může stát etalonem vlnové délky pro Českou republiku, protože ověřená úroveň její stability splňuje doporučení mezinárodní komise. Před vyhlášením etalonu musí být vypracována zpráva a provedeno mezinárodní porovnání nebo absolutní měření.

Vlastní přínos

- Konstrukce laseru s prodlouženým rezonátorem
- Technologie antireflexních vrstev a jejich kvalifikace
- Konstrukce a úprava proudového kontroleru
- Konstrukce laseru s využitím modulu DFB laserové diody doplněná o ochrannou a modulační elektroniku
- Spolupráce na konstrukci teplotního kontroleru
- Návrhy absorpčních kyvet, plnění acetylenem a měření parametrů. Sestava F-P rezonátoru s vloženou acetylenovou absorpční kyvetou
- Sestavení stabilizovaného DFB laseru s využitím lineární absorpce
- Detekce subdopplerovské spektrální čáry a stabilizace optické frekvence DFB laseru
- Měření optických komponentů, řešení problémů s optovláknovou technologií

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Balling, P., Křen, P., Development of Wavelength Standard at 1542 nm, Acetylene Stabilized DFB Laser, In WDS'05 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics, J. Safrankova, ed. Prague. Matfyz press, 2005, s. 590-594
- [2] Bradley, C.C., Chen, J., Hulet, R.G., Instrumentation for stable operation of laser diodes, Rev. Sci. Instrum. 61, s. 2097-2101, 1990
- [3] Číp, O., Frequency stabilization of laser diodes and high-precision laser interferometry, Disertační práce, Brno, FEKT VUT v Brně, 2001
- [4] de Labachellerie, M., Nakagawa, K., Awaji, Y., Ohtsu, M., High-frequency-stability laser at 1.5 μm using Doppler-free molecular lines, Optics Letters 20, 6, s. 572-574, 1995
- [5] de Labachellerie, M., Nakagawa, K., Ohtsu, M., Ultranarrow $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ saturated-absorption lines at 1.5 μm , Optics Letters 19, s. 840-842, 1994
- [6] Demtröder, W., Laser Spectroscopy, Springer, 2. vydání, Berlin, 1996, ISBN 3-540-57171-X
- [7] Drever, R.W.P., Hall, J.L., Kowalski, F.V., Hough, J., Ford, G.M., Munley, A.J., Ward, H., Laser phase and frequency stabilization using an optical-resonator, Appl. Phys. B 31, s. 97-105, 1983
- [8] Dutta, B.K., Biswas, D., Ray, B., Ghosh, P.N., Diode laser spectroscopic measurement and impact theoretical analysis of collision broadening of acetylene ($\nu_1 + 3\nu_3$) band transitions, Eur. Phys. J. D11, s. 99-108, 2000
- [9] Chen, J., Li, D., Lu, Y., Experimental and theoretical studies on monitored signals from semiconductor diodes undergoing antireflection coatings, Applied Optics 30, s. 4554-4559, 1991
- [10] Ikegami, T., Sudo, S., Sakai, Y., Frequency Stabilization of Semiconductor Laser Diodes, Artech House, Boston, 1995, ISBN 0-89006-648-5
- [11] Jedlička, P., Instrumentation for narrow linewidth semiconductor laser, SPIE Vol.3820, s. 298-301, 1999
- [12] Kaminov, I. P., Eisenstein, G., Stultz, L. W., Measurement of the Modal Reflectivity of an Antireflection Coating on a Superluminescent Diode, IEEE J. Quant. Electron. QE-19, s. 493-495, 1983
- [13] Lazar, J., Číp, O., Jedlička, P., Tunable extended-cavity diode laser stabilized on iodine at $\lambda = 633\text{nm}$, Appl. Opt. 39, s. 3085-3088, 2000
- [14] Lazar, J., Detection techniques in saturated absorption spectroscopy and their employment in laser frequency stabilization, Disertační práce, Brno, VUT v Brně, 1996
- [15] Libbrecht, K.G., Hall, J.L., A low-noise high-speed diode laser current controller, Rev. Sci. Instrum. 64 (8), s. 2133-2135, 1993
- [16] Littman, M.G., Metcalf, H.J., Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander, Applied Optics 17, 14, s. 2224-2227, 1978

- [17] Liu, K., Littman, M.G., Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers, *Optical Letters* 6, 117-121, 1981
- [18] Luo, B., Wu, L., Chen, J., Lu, Y., Determination of Wavelength Dependence of the Reflectivity at AR Coated Diode Facets, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 5, s. 1279-1281, 1993
- [19] Nakagawa, K., de Labachellerie, M., Awaji, Y., Kourogi, M., Accurate optical frequency atlas of the 1.5- μm bands of acetylene, *J. Opt. Soc. Am. B*, 13, s. 2708-2714, 1996
- [20] Nakagawa, K., de Labachellerie, M., Awaji, Y., Kourogi, M., Enami, T., Ohtsu, M., Highly precise 1-THz optical frequency-difference measurement of 1.5- μm molecular absorption lines, *Optics Letters* 20, s. 410-412, 1995
- [21] Ohtsu, M., *Frequency Control of Semiconductor Lasers*, editor Ohtsu, M., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996, ISBN 0-471-01341-2
- [22] Onae, A., Okumura, K., Yoda, J., Nakagawa, K., Yamaguchi, A., Kourogi, M., Imai, K., Widiyatomo, B., Towards an Accurate Frequency Standard at 1.5 μm Based on the Acetylene Overtone Band Transition, *IEEE Transaction on Instrumentation and Meas.* 48, 2, s. 563-565, 1999
- [23] Petrů, F., Popela, B., Veselá, Z., Design and performance of compact iodine stabilized He-Ne lasers at 633 nm with a short optical resonator, *Meas. Sci. Technol.* 4, 1993, s. 506-512.
- [24] Quinn, T.J., *Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992)*, *Metrologia* 1993/94, 30, s. 523-541.
- [25] *Recommendations of the Consultative Committee for Length (CCL)*, report from the 10th meeting, BIPM, 2001
- [26] Swann, W.C., Gilbert, S.L., Pressure induced shift and broadening of 1510-1540 nm acetylene wavelength calibration lines, *J. Opt. Soc. Am. B* 17, s. 1263-1269, 2000
- [27] Telle, H.R., Stabilization convergence of gradient-based reconstruction using multiscale modes, *Spectrochimica Acta Rev.* 15, s. 301-327, 1993
- [28] Wang, M., Ding, S., Feng, D., Liu, H., Lie-algebraic approach to vibrational spectra of a linear symmetrical tetratomic molecule: C_2H_2 , *Physical Review A*, 66, s. 022506-1 – 022506-10, 2002
- [29] Zheng, W., Automated Fusion-Splicing of Polarization Maintaining Fibers, *Journal of Lightwave Technology* 15, 1, s. 125-132, 1997

VLASTNÍ PUBLIKACE

- [30] Růžička, B., Wilfert, O., Measurement of Residual Reflectivity and Wavelength of Coated Laser Diodes, In *Radioelektronika 2001.*, Ústav radioelektroniky, VUT v Brně, s. 286 - 289, 2001, ISBN 80-214-1861-3
- [31] Růžička, B., Deposition and Measurement of Antireflection Coatings for Semiconductor, Laser, In *Proceedings of 7th conference Student FEI 2001*, Brno, Ing. Zdeněk Novotný, s. 291 - 295, 2001, ISBN 80-214-1860-5

- [32] Růžička, B., Wilfert, O., Residual Reflectivity of Amplification Media for Extended-Cavity Laser, In Seveth International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life., Washington, USA: SPIE-The International Society for Optical Engineering, s. 352 - 356, 2002, ISBN 0-8194-4686-6
- [33] Růžička, B., Wilfert, O., Current Source for Laser Diodes with High Protection Against EMI, In 12th International Scientific Conference Radioelektronika 2002, Bratislava, s. 266 - 269, 2002, ISBN 80-227-1700-2
- [34] Mikel, B., Růžička, B., Číp, O., Lazar, J., Jedlička, P. Stabilní polovodičové lasery v metrologii délek, Jemná mechanika a optika, ISSN 0447-6441, 11-12, s. 341 – 344, 2002
- [35] Růžička, B., LabVIEW a jeho využití, In Sborník příspěvků a prezentací akce Odborné semináře 2002, ev.č. REL01V, Brno, UREL FEKT VUT v Brně, s. 173 – 184, 2002
- [36] Růžička, B., Electromagnetic Interference Protected Current Controller for Laser Diodes, In Proceedings of 8th Conference STUDENT EEICT 200, Student EEICT 2002, Brno, VUT v Brně, FEKT, s. 342 - 346, 2002, ISBN 80-214-2116-9
- [37] Lazar Josef, Číp Ondřej, Jedlička Petr, Růžička Bohdan: Extended cavity semiconductor lasers in fundamental metrology. In: Proceedings of SPIE – The International society for optical engineering. Seventh international symposium on laser metrology applied to science, industry, and everyday life, Vol. 4900, Novosibirsk, Ruská federace, s. 132-138, 2002
- [38] Růžička, B., Lazar, J., Číp, O., Wilfert, O., Workplace for demonstration of frequency stabilization of laser using personal computer, In Proceedings – Region 8 EUROCON 2003, The International Conference on Computer as a Tool, Zajc, B., Tkalcic, M., Ljubljana, Slovinsko, s. 142 - 145, 2003, ISBN 0-7803-7763-X
- [39] Růžička, B., Wilfert, O., Lazar, J., Číp, O., Single Frequency Semiconductor Laser at 635 nm Stabilized by Means of Linear Absorption of Molecular Iodine with Spectral Analyse, In Conference Proceedings ICECom 2003 - 17th International Conference on Applied Electromagnetic and Communications, Bonafacic, D., Dubrovnik, Chorvatsko, KoREMA, s. 282 - 285, 2003, ISBN 953-6037-39-4
- [40] Růžička, B., Wilfert, O., Practical education of semiconductor laser frequency stabilization by linear absorption, In Radioelektronika 2003, s. 308 - 311, 2003, ISBN 80-214-2383-8
- [41] Mikel, B., Růžička, B., Číp, O., Lazar, J., Jedlička, P., Highly coherent tunable semiconductor lasers in metrology of length, In Proceedings of SPIE – The International society for optical engineering. Photonic, devices, and systems II, Vol. 5036, s. 8 - 13, 2003, ISBN 0-8194-4837-0

- [42] Růžička, B., Device for education of frequency stabilization of semiconductor laser by linear absorption, In Proceedings of the international conference and competition STUDENT EEICT 2003, VUT v Brně, FEKT, 2003, s. 71 - 75, ISBN 80-214-2401
- [43] Růžička, B. Polovodičové lasery pro metrologii a telekomunikace, In Sborník příspěvků RADEŠÍN 2003, Radešín 2003, editoři: Růžička, B., Kratochvíl, T., Lazar, J., s. 18 - 19, 2003, ISBN 80-214-2479-6
- [44] Růžička, B. Demonstrační pracoviště stabilizace polovodičového laseru lineární absorpcí, In Odborné semináře 2003, Odborné semináře 2003, s. 1- 4, 2003
- [45] Lazar, J., Jedlička, P., Číp, O., Růžička, B., Laser diode current controller with a high level of protection against electromagnetic interference, Review of Scientific Instruments 74, s. 3816-3819, 2003
- [46] Lazar, J., Růžička, B., Číp, O., Etalon of optical frequency for the telecommunication spectral region. In Proceedings of SPIE – The International society for Optical Metrology in Production Engineering, Strasbourg, 5457, s. 240-244, 2004
- [47] Lazar, J., Číp, O., Růžička, B., The design of a compact and tunable extended-cavity semiconductor laser. Measurement Science and Technology 15, s. N6-N9, 2004

CURRICULUM VITAE

Jméno: Ing. Bohdan Růžička
Datum narození: 6. prosince 1974
Státní občanství: Česká republika
Národnost: česká
Adresa: Vychodilova 10, 616 00 Brno
E-mail: ruzicka@isibrno.cz

Vzdělání

1989 – 1993 Gymnázium Brno, třída Kapitána Jaroše 14.
1994 – 2000 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, magisterský studijní program Elektronika a sdělovací technika.
2000 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, doktorský studijní program Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika.

Praxe

1999 – dosud Zaměstnán v Ústavu přístrojové techniky, AVČR

Grantové projekty FRVŠ (hlavní řešitel)

2002 Frekvenční stabilizace polovodičového laseru lineární absorbcí v jódu
2003 Spektrální analyzátor na bázi Fabryova-Perotova rezonátoru

Odborné zaměření

lasery pro metrologické aplikace, urychlovače částic, generace synchrotronového záření

Jazykové schopnosti

angličtina – pokročilý, španělština – mírně pokročilý, ruština – středně pokročilý, němčina – středně pokročilý

ABSTRACT

The thesis presents design, development and realization of laser system with stabilized optical frequency which could become the basis of an etalon of wavelength for the telecommunication band of the near-infrared spectral region.

Semiconductor DFB laser diode is used as a tunable source of radiation with narrow linewidth. Its optimum operation is ensured by especially designed current and temperature controller. The laser is prestabilized using FM spectroscopy technique to the passive Fabry-Perot cavity. This fast feed-back loop is able to improve spectral characteristics of the laser. The center frequency of the F.-P. cavity - the laser optical frequency is locked by a slow second feed-back loop to the absorption spectral line of acetylene $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ gas. The slow control loop is based on the third derivative spectroscopy technique. Relative stability at the level of 10^{-12} was achieved.