



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Frekvenční stabilizace laserové diody za využití principu ECDL

Bakalářská práce

Studijní program: B3901 – Aplikované vědy v inženýrství

Studijní obor: 3901R055 – Aplikované vědy v inženýrství

Autor práce: **Lukáš Veselý**

Vedoucí práce: Ing. Jan Kredba





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Laser diode frequency stabilization using ECDL principle

Bachelor thesis

Study programme: B3901 – Applied Science in Technology

Study branch: 3901R055 – Applied Science in Technology

Author: **Lukáš Veselý**

Supervisor: Ing. Jan Kredba





Zadání bakalářské práce

Frekvenční stabilizace laserové diody za využití principu ECDL

Jméno a příjmení: **Lukáš Veselý**
Osobní číslo: M16000104
Studijní program: B3901 Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Aplikované vědy v inženýrství
Zadávací katedra: Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši aktuálně využívaných laserových diod zejména v oblasti laserové interferometrie a holografie; porovnejte jejich výhody a nevýhody.
2. Proveďte rozbor principu funkce ECDL, jeho variant a možností využití pro stabilizaci Fabry-Perotovy laserové diody.
3. Navrhněte a zrealizujte experimentální uspořádání ECDL a ověřte jeho funkčnost.
4. Porovnejte kvalitu výstupního laserového svazku z experimentálního uspořádání ECDL s běžně komerčně dostupnými laserovými diodami.
5. Zhodnoťte přínos ECDL, popřípadě navrhněte možnosti úpravy uspořádání pro dosažení vyšší kvality výstupního svazku.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] SALEH, Bahaa E. A a Malvin Carl TEICH. Fundamentals of photonics. New York: Wiley, c1991. ISBN 9780471839651.
[2] SALIBA, Sebastian D., et al. Mode stability of external cavity diode lasers. Applied optics, 2009, 48.35: 6692-6700.
[3] BAILLARD, X., et al. Interference-filter-stabilized external-cavity diode lasers. Optics Communications, 2006, 266.2: 609-613.

Vedoucí práce: Ing. Jan Kredba
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Datum zadání práce: 18. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2019

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci 18. října 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

V první řadě chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, za nespočet rad a technickou pomoc s měřicími přístroji, které jsem v životě neviděl. Dále chci poděkovat své přítelkyni Kateřinečce za pevné nervy a podporu, když jsem dokončoval tuto práci. Také svým spolužákům za spousty a spousty diskuzí ohledně LaTeXu a stylistických záležitostí. V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině, za to že mě podporuje ve studiu.

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je sestavení a ověření funkčnosti experimentálního uspořádání pro frekvenční stabilizaci Fabry-Perotovy laserové diody s využitím externí kavity. V rámci teoretické části práce je popsán funkční princip laserů společně s jejich typovým dělením. Dále jsou zde rozebrány možnosti frekvenční stabilizace externí kavitou. Praktická část je zaměřena na návrh a realizaci frekvenční stabilizace diody. S ohledem na požadované vlastnosti a dostupné komponenty bylo zvoleno uspořádání laserové diody s vláknovým výstupem stabilizované objemovou difrakční mřížkou. Vylepšené vlastnosti Fabry-Perotovy laserové diody jsou porovnány s komerčně dostupnou DFB laserovou diodou a použitelnost celého řešení je otestována reálným interferometrickým měřením.

Klíčová slova: laser, ECDL, difrakční objemová mřížka, frekvenční stabilizace, interferometrie

Abstract

The subject of the bachelor thesis is to build and verify the functionality of experimental setup for frequency stabilization of Fabry-Perot laser diode using external cavity. The theoretical part of the thesis describes the functional principle of lasers together with their type division. It also discussed the possibility of frequency stabilization of the external cavity. The practical part is focused on the design and implementation of the frequency stabilization of the diode. With consideration to the required properties and available components, a laser diode setup with a fiber output stabilized by a volume diffraction grating was chosen. Improved properties of the Fabry-Perot laser diode are compared with the commercially available DFB laser diode and the function of the whole solution is tested by real interferometric measurements.

Keywords: laser, ECDL, volume diffraction grating, frequency stabilization, interferometry

Obsah

Úvod	14
1 Laser	15
1.1 Historie	16
1.2 Princip funkce	16
1.2.1 Aktivní prostředí	17
1.2.2 Rezonátor	19
1.2.3 Mody optického rezonátoru	21
1.3 Druhy laserů	22
1.3.1 Pevnolátkové lasery	22
1.3.2 Plynové lasery	22
1.3.3 Polovodičové lasery	23
1.4 Aplikace	24
1.4.1 Metrologie	24
1.4.2 Strojírenství	24
1.4.3 Lékařství	25
2 Frekvenční stabilizace externí kavitou	26
2.1 Plošná difrakční mřížka	26
2.2 Braggovy difrakční mřížky v optickém vlákně	28
2.3 Objemová difrakční mřížka	28
3 Vlastní realizace ECDL	30
3.1 Postředky pro realizaci	30
3.1.1 Laserová dioda	30
3.1.2 Kolimátor	30
3.1.3 Objemová difrakční mřížka	31
3.2 Experimentální uspořádání	32
4 Experimentální výsledky	33
4.1 Charakteristika laserové diody	33
4.1.1 Teplotní závislost laserové diody	33
4.1.2 Výstupní výkon laserové diody	35

4.2	Frekvenčně stabilizovaný výstup	36
4.2.1	Měření po vložení apertury před hologram	38
4.2.2	Zkrácení externí kavity	39
5	Srovnání s komerčním řešením	43
	Závěr	46

Seznam obrázků

1.1	Schéma pevnolátkového laseru s aktivní prostředím z rubínového krystalu – zpracováno dle [6]	16
1.2	Blokové schéma zesilovače s kladnou zpětnou vazbou – zpracováno dle [8]	17
1.3	Absorpce fotonu elektronem – zpracováno dle [3]	18
1.4	Spontánní emise fotonu z vyšší energetické hladiny – zpracováno dle [3]	19
1.5	Stimulovaná emise – zpracováno dle [3]	19
1.6	a) rezonátor s rovinnými zrcadly; b) rezonátor se sférickými zrcadly; c) kruhový rezonátor; d) vláknový rezonátor	20
1.7	Příklady vlnových délek stojatých vln vytvářených v rezonátoru – zpracováno dle [3]	21
2.2	Schéma uspořádání Littman-Metcalf – zpracováno dle [14]	27
2.3	Schéma funkce objemové difrakční mřížky	28
3.1	Základní specifikace diody QFDL-780-10S, převzato z [17]	30
3.2	Princip funkce kolimátoru – zpracováno dle [18]	31
3.3	Objemová difrakční mřížka od firmy Ondax, Inc.	31
3.4	Schéma experimentálního uspořádání	32
3.5	Setup s VHG a délkou kavity 200 mm	32
4.1	Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 7400 Ω	34
4.2	Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 7800 Ω	34
4.3	Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 8200 Ω	34
4.4	Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 8600 Ω	34
4.5	Průběh vlnové délky diody QFLD-780-10S při $I = 110$ mA, $R = 7600$ Ω	35
4.6	Průběh vlnové délky po vložení hologramu při 7900 Ω a 97.74 mA . .	37
4.7	Průběh vlnové délky po vložení hologramu při 7950 Ω a 100 mA . . .	37
4.8	Průběh vlnové délky po vložení apertury a hologramu při 7850 Ω a 101.8 mA	38
4.9	Průběh vlnové délky po vložení apertury a hologramu při 7900 Ω a 102 mA	39
4.10	Setup po zkrácení kavity na 90 mm.	40

4.11	Průběh vlnové délky po třiceti minutách na ustálení.	41
4.12	Průběh vlnové délky ihned po seřízení VHG.	41
4.13	Záznam z řádkového detektoru ve vlnoměru ihned po seřízení VHG .	42
4.14	Záznam z řádkového detektoru ve vlnoměru po třiceti minutách na ustálení	42
5.1	Záznam průběhu vlnové délky DFB diody	43
5.2	Záznam průběhu vlnové délky ECDL uspořádání	43
5.3	Experimentální Fizeau interferometr	44
5.4	Interferogram po připojení QFLD-780-10S – a) bez VHG, b) s VHG	45
5.5	a) interferogram po připojení DFB laseru, b) interferogram po při- pojení QFLD-780-10S s VHG	45

Seznam tabulek

4.1	Výkon laserové diody QFLD-785-10S	35
4.2	Výkon laserové diody QFLD-785-10S – základní setup (obrázek 3.5) .	36
5.1	Porovnání DFB diody s ECDL uspořádáním, souhrnné ceny poskytl Centrum TOPTEC – Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.	43

Seznam zkratek

ECDL	External cavity diode laser (Externí kavita laserové diody)
E	Energie elektromagnetického záření
f	Frekvence elektromagnetického záření
h	Planckova konstanta – fyzikální konstanta vyzařovacího zákona černého tělesa
λ	Vlnová délka elektromagnetického záření
VHG	Volume holographic grating (Objemová difrakční mřížka)

Úvod

Za dobu své existence si polovodičové laserové diody našly uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti, například v lékařství, průmyslu a metrologii. Právě v metrologii při interferometrických či holografických měřeních se klade veliký důraz na frekvenční stabilitu výstupního laserového svazku. Komerční laserové diody běžně používané pro tyto účely, jsou často velmi drahou záležitostí. Jako vhodná alternativa se nabízí možnost externě stabilizovat frekvenci cenově dostupnější laserové diody, tak aby byla vhodná na interferometrická měření, ovšem za zlomek ceny komerčně dostupných vysoce stabilních laserových diod.

Hlavní vizí této bakalářské práce je dostatečně kvalitně stabilizovat frekvenci výstupního laserového svazku vycházejícího z Fabry-Perotovy laserové diody, využitím principu ECDL, tedy externí kavity vložené za výstup z laserové diody. Aby bylo možné sestavit experimentální uspořádání ECDL, je nejprve nutné porozumět tomu co to vlastně je laser. Jak v aktivním prostředí díky jevu stimulované emise vznikají fotony a jak jsou následně pomocí rezonátoru vráceny zpět do aktivního prostředí, kde jsou znovu zesilované s exponenciálním nárůstem. Těmito tématy spolu s historií a rozdělením laserů se zabývá první část práce. Dále jsou zde probrány různé způsoby realizace externí kavity pro frekvenční stabilizaci, popis jejich funkce, výhody a nevýhody.

Praktická část práce popisuje zvolené uspořádání ECDL včetně použitých komponent. Zároveň jsou zde uvedena měření, která mají kvantifikovat kvalitu frekvenční stabilizace. Na závěr je popsáno interferometrické měření na Fizeau interferometru s délkou kavity 430 mm. To bylo zvolené z důvodu velké citlivosti na sebemenší změnu frekvence použitého laserového svazku. Úspěšnost daného experimentu je tak přímo podmíněna dobrou frekvenční stabilizací.

1 Laser

Laser je zdrojem koherentního elektromagnetického záření, které je téměř monochromatické. Toto záření je generováno stimulovanou emisí v aktivním prostředí umístěného v rezonátoru, kde je opakovaným průchodem zesilováno. Právě na základě tohoto principu vznikl akronym LASER spojením anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Což ve volném překladu znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. Díky speciálním vlastnostem světla, které generuje, má veliký význam v oblasti interferometrie a holografie. Pokud bychom chtěli srovnávat vlastnosti laseru a jiného světelného zdroje například žárovky, uvidíme čtyři oblasti, kde se tyto dva zdroje diametrálně odlišují. [1]

Způsob vyzařování – Ačkoliv oba vyzařují elektromagnetické záření ve formě světla, tam jejich podobnost končí. Světlo v žárovce vzniká prostým průchodem elektrického proudu wolframovým vláknem, které se tím zahřívá. Vláknem se tedy chová jako černé těleso, jehož vyzařování se řídí Planckovým vyzařovacím zákonem. [2][3]

Účinnost – Se způsobem vyzařování také souvisí účinnost, protože u žárovky se velká část elektrické energie přemění na tepelnou. Z tohoto důvodu je účinnost laseru mnohem větší, protože fotony jsou zde vytvářeny excitací atomů v aktivním médiu a nedochází zde k tak velikým tepelným ztrátám. [2][3]

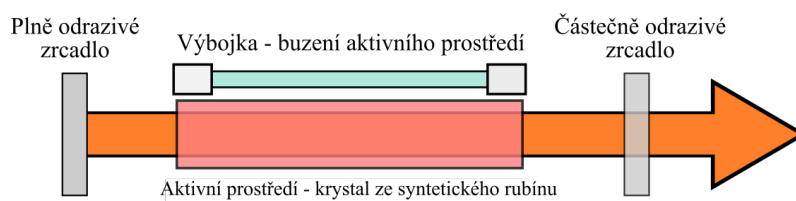
Spektrum – Lasery vyzařují pouze ve velmi úzkém elektromagnetickém spektru, to má za následek téměř monochromatickou záření. Toto záření se typicky nachází buď v oblasti vlnových délek viditelného světla nebo v jeho okolí, infračervené a ultrafialové lasery. Naproti tomu klasická žárovka s rozžhaveným wolframovým vláknem vyzařuje ve velmi širokém pásmu viditelného a infračerveného záření. [2][3]

Šíření – Dalším rozdílem je způsob šíření světla od těchto dvou zdrojů. Vláknem žárovky vyzařuje do všech stran, zatímco laser směřuje paprsek pouze jedním směrem a tím osvětluje pouze malou plochu. Díky tomu jsme schopni získat vysoké hodnoty výkonu na jednotku plochy. [2][3]

1.1 Historie

Předchůdcem laseru byl maser, který sice generuje mikrovlnné záření, ale také pracuje na principu stimulované emise (viz kapitolu 1.2.1).

Albert Einstein popsal fyzikální princip laseru už v roce 1917, dokázal rozpoznat a popsat stimulovanou emisi. Dalším vědcem, který se zabýval stimulovanou emisí, byl Richard Chace Tolman, který v roce 1924 nastínil myšlenku, že kdyby se atomy a molekuly nacházely z větší části ve vyšší energetické hladině, docházelo by k „záporné absorpci“. Až americký fyzik Theodore Maiman z Hughes Laboratory sestrojil jako první v roce 1960 funkční laser. Využil k tomu krychli o hraně 1 cm ze syntetického rubínu jako aktivní prostředí a výbojku (obrázek 1.1). Jako rezonátor se použila dvě rovnoběžně umístěná zrcadla, jedno z nich částečně propustné a druhé maximálně odrazivé. Laser zkonstruovaný Theodorem Maimanem nemohl konkurovat dnešním laserům, nebyl schopný fungovat v kontinuálním režimu, zvládal pouze režim pulsů. [4][7]



Obrázek 1.1: Schéma pevnolátkového laseru s aktivním prostředím z rubínového krystalu – zpracováno dle [6]

1.2 Princip funkce

Laser je v podstatě oscilující optický zesilovač (obrázek 1.2), ve kterém se výstupní signál vrací zpět na vstup přes kladnou zpětnou vazbu. Tento zesílený vstup se opět z výstupu přivede na vstup a je znovu zesílený. Ideální zesilovač s kladnou zpětnou vazbou by signál zesiloval až do nekonečna. V reálné praxi jsme bohužel omezení saturací zesilovače, kdy dochází k tomu, že vstupní signál již není více zesilován. Zesílení obvodu s kladnou zpětnou vazbou popisuje vztah:

$$A'_U = \frac{A_U}{1 - A_U \cdot \beta} \quad (1.1)$$

kde:

A'_U = zesílení se zpětnou vazbou

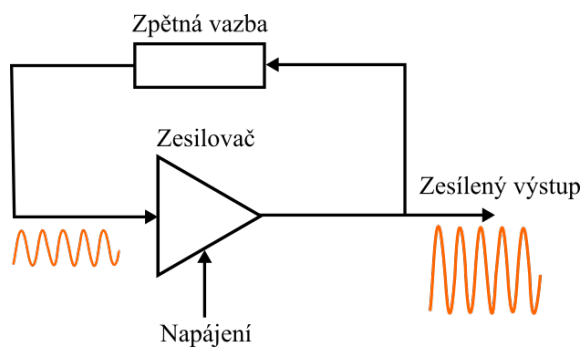
A_U = zesílení zesilovače

β = zpětnovazební přenos

Aby mohlo dojít k oscilacím a následnému zesílení, musí být splněny dvě podmínky. [1] [2] [3]

Amplitudová podmínka – Při průchodu signálu zpětnou vazbou se musí dosáhnout zisku. To znamená že zisk zesilovače musí být větší než ztráty ve zpětnovazební smyčce. [3]

Fázová podmínka – Změna fáze výstupního signálu, který projde zpětnou vazbou, se smí změnit pouze o celočíselné násobky 2π , takže zpětnovazební signál je vždy se vstupním signálem ve fázi. [3]



Obrázek 1.2: Blokové schéma zesilovače s kladnou zpětnou vazbou – zpracováno dle [8]

1.2.1 Aktivní prostředí

Funkci zesilovače zastupuje v laseru aktivní prostředí, ve kterém se zvyšuje amplituda světelného záření a zároveň je zde zpětnovazební signál ve fázi se vstupním. Jsou to látky, ve kterých se musí vyskytovat atomy nebo molekuly, jejichž elektrony mají schopnost vybudit se na vyšší energetickou hladinu. Takový zesilovač označujeme jako koherentní optický zesilovač. V aktivním prostředí dochází ke třem základním interakcím fotonu s atomy látky, ze které je aktivní prostředí tvořeno. Základním stavebním kamenem zesilování světla je stimulovaná emise. K té by ovšem nemohlo docházet bez předchozí absorpce a spontánní emise. [1][2][3]

Absorpce energie fotonu – Elektron se do vybuzeného stavu (excitace) dostane díky pohlcení (absorpci) energie. Touto energií je ve většině případů foton, který má stejnou energii jako rozdíl energií dvou energetických hladin (vztah 1.2).

Další možností jak vybudit elektron je interakcí děr a volných elektronů v P-N přechodu polovodiče (viz kapitolu 1.3.3). Na této hladině však elektron vydrží jen velmi krátkou dobu, poté spadne na o něco nižší energetickou hladinu tzv. metastabilní hladinu. Během tohoto přechodu vyzařuje část své energie ve formě tepla. V této hladině je elektron stabilnější, ovšem to neznamená, že v metastabilní hladině může zůstat napořád. Po krátké době, která je ovšem větší než v jakékoliv jiné hladině s výjimkou základní hladiny, se elektron zářivým přechodem vrací zpět na základní energetickou hladinu. Pokud se v metastabilní hladině nachází více elektronů než v základní energetické hladině, mluvíme o inverzní populaci. [2][3]

$$h \cdot f = E_2 - E_1 \quad (1.2)$$

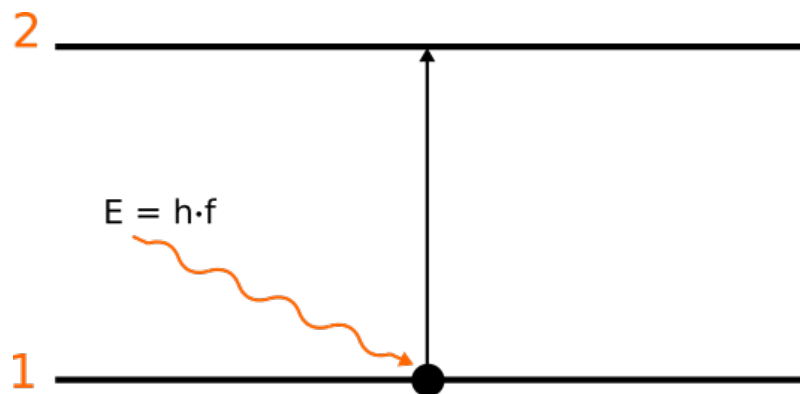
kde:

h = Planckova konstanta

f = Frekvence záření, jehož součástí je námi sledovaný foton

E_1 = Energie potřebná pro setrvání v energetické hladině 1

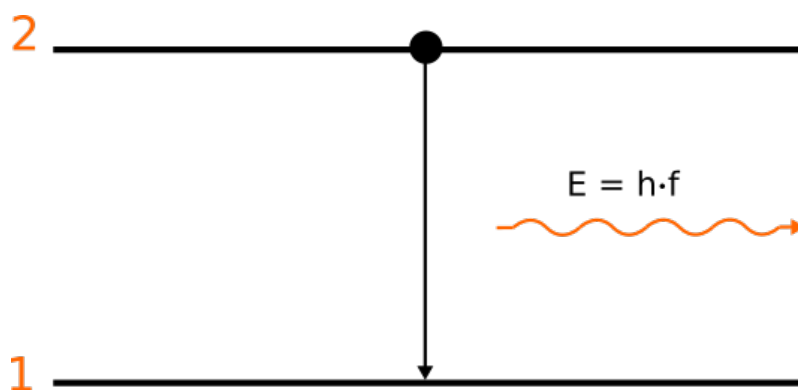
E_2 = Energie potřebná pro setrvání v energetické hladině 2



Obrázek 1.3: Absorpce fotonu elektronem – zpracováno dle [3]

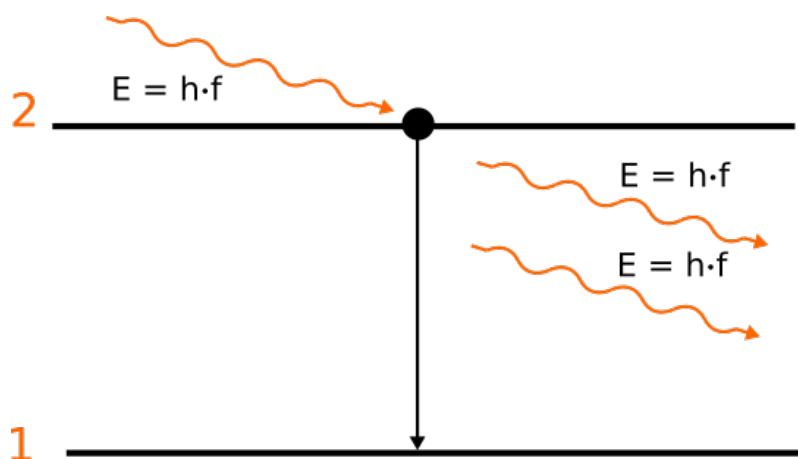
Spontánní emise – Nachází-li se elektron na vyšší energetické hladině a pokud během této doby neinteraguje s fotonem, tak samovolně přechází na nižší energetickou hladinu zářivým přechodem. Během tohoto přechodu se uvolněná energie (vztah 1.2) vyzařuje v podobě fotonu, který směřuje náhodným směrem. [2][3]

Stimulovaná emise – Vzhledem k tomu, že elektron v metastabilní hladině setrvává delší dobu, mají přilétající fotony větší šanci interagovat s vybuzeným elektronem. Pokud je elektron v metastabilní hladině stimulován přilétajícím fotonem,



Obrázek 1.4: Spontánní emise fotonu z vyšší energetické hladiny – zpracováno dle [3]

který splňuje vztah 1.2. Dochází k přesunu elektronu na nižší energetickou hladinu jako při spontánní emisi, ale s tím rozdílem, že z reakce vystupují dva fotony, které mají navíc stejný směr jako foton, který emisi vyvolal. Tato výsledná vlna má větší amplitudu než vlna jejíž součástí byl počáteční foton. Vzniká tím tedy zesílená vlna. [2][3][7]

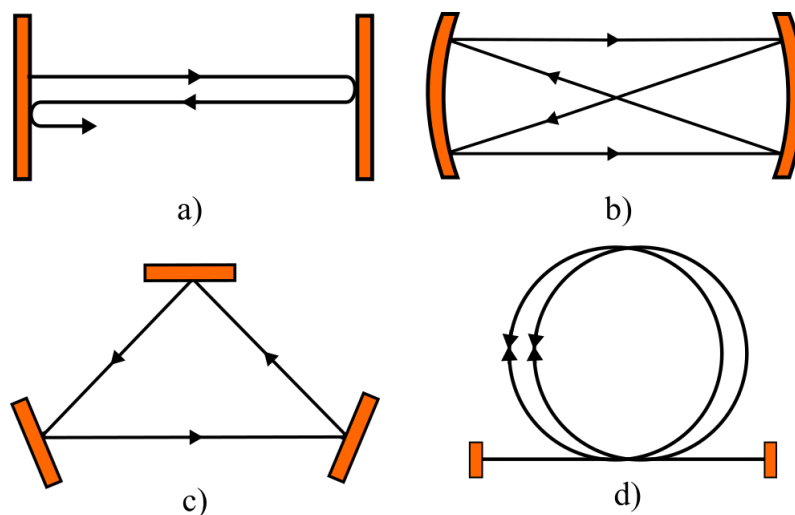


Obrázek 1.5: Stimulovaná emise – zpracováno dle [3]

1.2.2 Rezonátor

Samotné aktivní prostředí nemůže fungovat jako oscilační optický zesilovač. Ke správné činnosti je potřeba zpětná vazba. Tu v případě laseru realizujeme pomocí rezonátoru, který je nejčastěji tvořen dvěma zrcadly. Jedno z nich je úplně odrazivé, tedy veškeré dopadající světlo se odráží zpět pod stejným úhlem. Druhé zrcadlo je částečně propustné, tudíž propouští jen určité procento záření ven z rezonátoru. Fotony, které dopadají kolmo na zrcadla se bez vychýlení odráží mezi nimi, jedná se

tedy o zpětnou vazbu. S každým odrazem se intenzita světla snižuje, protože dochází ke ztrátám na zrcadlech, to symbolizuje ztráty ve zpětné vazbě. Existují samozřejmě i jiné možnosti realizace rezonátoru, například kruhové nebo vláknové. Všechna provedení mají stejnou vlastnost, po daném počtu odrazů se světlo vrací na svou původní dráhu. [1][2][3][5]



Obrázek 1.6: a) rezonátor s rovinnými zrcadly; b) rezonátor se sférickými zrcadly; c) kruhový rezonátor; d) vláknový rezonátor

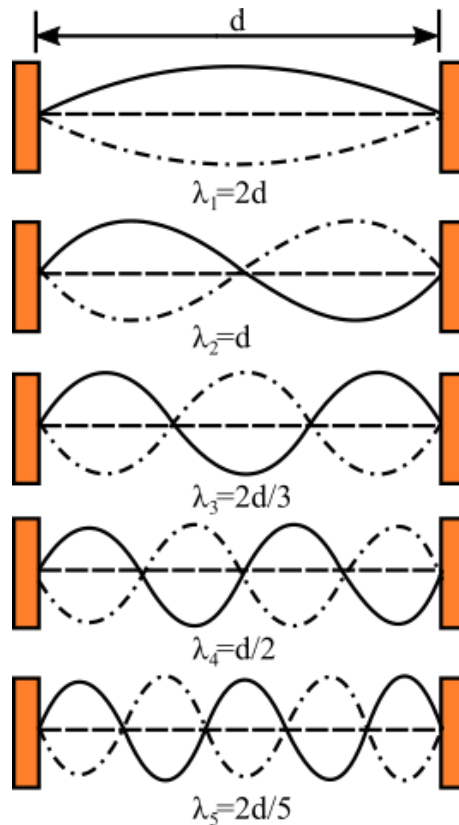
Ideálně chceme v rezonátoru dosáhnout toho, že se budou zesilovat jen fotony jedné frekvence (viz kapitolu 2) a jednoho směru, který je kolmý na zrcadla rezonátoru. Při prvních spontánních a stimulovaných emisích budou mít fotony náhodné směry. To znamená že velká část emitovaných fotonů nebude mít směr kolmý na zrcadla rezonátoru, tudíž nejsou vhodné k dalšímu zesilování. Tyto vychýlené fotony se naštěstí samy eliminují odrazy na rozhraní rezonátoru a nedohází k dalším stimulovaným emisím s fotonem, který nemá směr kolmý na zrcadla. Při odražení fotonu od zrcadla platí zákon dopadu a odrazu, to znamená že foton se odrazí pod stejným úhlem jako dopadl. Pokud tedy foton nedopadá pod úhlem 90° po určitém počtu odrazů od zrcadel dojde k vyletění fotonu mimo aktivní prostředí. [1][2][3]

Speciálním případem aktivních prostředí jsou ty, které mají dostatečně veliký zisk a pracují v režimu zesílené spontánní emise. Zpětnou vazbu v podobě rezonátoru tedy vůbec nepotřebují, jsou to například dusíkové lasery. [3]

1.2.3 Mody optického rezonátoru

Volbou vzdálenosti zrcadel v rezonátoru dochází k výběru rezonanční frekvence, tedy k výběru vlnové délky výstupního elektromagnetického svazku. Po splnění obou podmínek pro oscilaci optického zesilovače se začnou v rezonátoru vytvářet laserové mody, pro které je zesílení větší než ztráty ve zpětné vazbě. Modů v rezonátoru vzniká velké množství, nejsou ovšem zesilovány stejnou měrou. Nejvíce zesilována je jen oblast kolem centrální frekvence. [5]

Podélné mody optického rezonátoru se dají charakterizovat jako stojaté vlny s vlnovou délkou odpovídající racionálnímu násobku velikosti rezonátoru. Tyto mody různou měrou přispívají na výsledné vlnové délce, monochromatickosti a šířce výstupní frekvenční čáry laserového světelného svazku. Pomocí principu ECDL se mnoho těchto stojatých vln eliminuje. V ideálním případě zůstane pouze jedna, která bude určovat vlnovou délku (viz kapitolu 3). [2][5]



Obrázek 1.7: Příklady vlnových délek stojatých vln vytvářených v rezonátoru – zpracováno dle [3]

Příčné mody jsou ty, které jsou kolmé na směr šíření fotonů v rezonátoru. Mod, který je symetrický kolem optické osy rezonátoru, se nazývá Gaussovský mod. Jeho největší intenzita leží na ose a rovnoměrně se snižuje se vzdáleností od osy. Jedná se o speciální mod ze skupiny Hermiteovských-gaussovských modů, jejichž vyšší řády již nejsou souvislé kolem osy, ale dělí se na více částí. [2]

1.3 Druhy laserů

Lasery dělíme především podle druhu aktivního prostředí, mezi základní patří pevnolátkové, polovodičové nebo plynové. Další rozdělení je možné podle vlnové délky, potom je dělení následovné. Infračervené vyzařují od 780 nm do 1 mm vlnové délky, následují lasery, které vyzařují ve viditelné oblasti, tedy 360 – 780 nm. Posledním typem jsou ultrafialové lasery emitující záření v oblasti 10 – 360 nm. [7]

1.3.1 Pevnolátkové lasery

V kapitole 1.2 Princip funkce je popsáno chování aktivního prostředí a rezonátoru právě v pevnolátkovém laseru. První sestavený laser (viz kapitolu 1.1) byl také právě laser, jehož aktivní prostředí tvořil speciálně upravený rubínový krystal. Obecně je v pevnolátkových laserech aktivní prostředí tvořeno krystalickými strukturami. Tento druh laseru je relativně nenáročný na sestavení a především jevy v pevném aktivním prostředí jsou snadněji fyzikálně popsatelné než v plynových laserech.

Emitované záření různých pevnolátkových laserů pokrývá velmi široké spektrum, přesněji od infračerveného světla až po červené viditelné záření. Nejčastěji používaný typ má aktivní prostředí tvořené Nd:YAG, který vyzařuje v infračervené oblasti typicky 1064,1 nm. YAG je zkratka pro bezbarvý a opticky izotropní materiál yttrito-hlinitý granát. Tento krystal je dopovaný ionty neodymu, zkratka Nd. Podle způsobu buzení je tento laser schopný pracovat jak v kontinuálním, tak i v pulsním režimu. V kontinuálním režimu, je možné dosáhnout výkonu až stovek wattů, v případě pulsního režimu lze dosáhnout ještě větších výkonů. Díky těmto dvěma vlastnostem nachází využití ve velmi velké škále oborů lékařstvím začínaje viz 1.4.3 a strojírenstvím konče viz 1.4.2. [5]

1.3.2 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů se může skládat z atomů, iontů nebo molekul plynů. Jedná se o lasery s nejnižší hustotou aktivního prostředí. Pro excitaci a vy-

volání inverzí populace se využívá elektrický výboj. Plynové lasery našly využití především díky možnosti měnit objem plynu v aktivním prostředí a tím upravovat vlastnosti laseru. Nejznámějším zástupce plynových laserů je helium-neonový. Způsob jeho čerpání je diametrálně odlišný od čerpání v pevnolátkovém laseru. Vysokofrekvenčním zdrojem energie lze snadno vybudit atomy helia na metastabilní hladiny. Vybuzené atomy helia mají téměř shodné energetické hladiny jako atomy neonu, proto si při srážkách předávají přesná kvanta energie. Atomy neonu po těchto srážkách přecházejí na vyšší energetickou hladinu a následnou spontánní emisí vyzáří foton. [2]

1.3.3 Polovodičové lasery

Na rozdíl od pevnolátkových a plynových laserů není aktivní prostředí buzeno externím zdrojem záření, ale dochází zde k injekci energie z P-N přechodu. Polovodiče absorbují a emitují fotony při přechodech mezi dovolenými hladinami. Tyto uspořádané hladiny tvoří pásy, které jsou úplně obsazené elektrony nebo naopak úplně prázdné. Nejvyšší obsazený pás je pásem valenčním, ten je oddělen zakázaným pásem od prázdného pásu, který se nazývá vodivostní. Absorpce fotonu elektronem může způsobit jeho přeskok z valenčního do vodivostního. Podmínkou je, že pohlcená energie z fotonu je dostatečná na překonání zakázaného pásu. Tento jev se uplatňuje u polovodičových detektorů. Další proces, ke kterému může v polovodiči docházet se nazývá rekombinace elektronu a díry. Pokud se ve valenčním pásu nachází díra je možné, že elektron z vodivostního pásu sestoupí a rekombinuje se s dírou, během kterého se může vyzářit foton. Tento jev lze označit za stimulovanou emisi. [2][3]

Polovodičové materiály neumožňují za pokojové teploty rekombinaci elektronů a děr v dostatečné míře, z důvodu nízké koncentrace vybuzených elektronů. Po použití vnějšího zdroje energie pro vybuzení dostatečného počtu párů elektron-díra, lze naměřit dostatečně veliký zářivý tok. Vhodným způsobem je připojit P-N přechod v propustném směru ke zdroji napětí, tím dojde k injekci elektronů a děr. Pokud je dodávané napětí dostatečně vysoké zvýší se počet elektronů a děr tolik, že vytvoří inverzní populaci. Díky které v důsledku převážení rekombinace nad absorpcí dochází k excitaci fotonů. [2][3]

Rezonátor se v polovodičových laserech realizuje vyleštěním dvou ploch krystalu polovodiče kolmých na P-N přechod. Tím je možné dosáhnou dostatečně odrazivosti pro správnou funkci rezonátoru. Takový rezonátor se nazývá Fabry-Perotův. [3]

1.4 Aplikace

Existují dva vědní a velmi důležité obory, jejichž rychlý rozvoj je důsledkem právě využitím laseru. Jedná se o interferometrii a holografii, které jsou klíčové i pro tuto bakalářskou práci. Laser má ovšem i spoustu dalších využití mezi které patří například strojírenství či lékařství.

1.4.1 Metrologie

Na základě vlnové podstaty světla může za speciálních podmínek docházet k viditelné interferenci dvou a více vln. Interferenci lze popsat jako výsledek superpozice několika světelných vln. Jelikož většina zdrojů světelného záření emituje fotony o různých frekvencích, tak se interferenční obrazec velmi rychle mění a lidské oko nebo jiný integrální snímač, které jsou schopné zachytit jen střední hodnotu intenzity, tak tento jev nedetekují. Pokud ovšem necháme interferovat dvě koherentní vlny o stejné frekvenci, vyzářené například laserem, jsme schopni pozorovat stabilní interferenční obrazec jakožto amplitudovou modulaci intenzity světla.

Pomocí interferometrů, což jsou přístroje využívající interference laserového záření, lze měřit například velmi malé změny vzdálenosti, index lomu, rychlost otáčení, tvar optických ploch, vibrace a mnoho dalšího. Obecně lze říci, že interferometry fungují na principu rozdělení jednoho paprsku na dva a jejich následného spojení, při kterém dochází k interferenci. Jeden z těchto rozdělených paprsků je naveden přímo na snímač. Druhý paprsek se nechá interagovat s předmětem, od kterého se odrazí zpět na snímač, kde spolu obě vlny interagují. [3][7]

1.4.2 Strojírenství

Laserové technologie ve strojírenství mají oproti většině konvenčních způsobů opracování výhodu v možnosti nulového kontaktu s opracovávaným výrobkem. Všechny technologické postupy opracování pomocí laseru se zakládají na schopnosti laseru koncentrovat vysokou energii na velice malou plochu. Největší podíl mezi používanými lasery mají pevnolátkové a dále pak velkou roli hrají lasery plynové (viz kapitole 1.3.1). Přesněji takové, jejichž aktivní prostředí tvoří oxid uhličitý CO_2 . Ve většině případů se lasery využívají v režimu co nejkratších pulzů s mnohem větší hustotou výkonu, než v kontinuálním režimu. U velmi výkonných laserů se dostáváme na hodnoty trvání pulzů jen 100 fs (femtosekunda) s výkony až 15 GW. Tím lze zajistit obrobiteľnosť jakéhokoliv materiálu. Díky těmto vlastnostem má laser uplatnění

v oblasti vrtání, řezání, svařování či zpracování povrchů (např. gravírování). Další výhodou je možnost snadné automatizace, to umožňuje rychlejší výrobu s nižšími náklady. [1][2][7]

1.4.3 Lékařství

Titul prvního lékařského zákroku, ve kterém byl použit laser, drží operace sítnice lidského oka. Zde byl laser použit k přivaření odchlípnuté sítnice. Toto prvenství se událo jen rok po představení laseru tedy v roce 1964. Po tomto úspěchu pokračovaly laserové operace v očním lékařství i v dalších letech. V roce 1965 začali první pokusy o operaci duhovky. V dnešních dnech se kromě operací zraku a oblasti dermatologie laser využívá také pro plastické operace. Stává se také nedílnou součástí estetické chirurgie (odstranění tetování, korekce vrásek) a kardiovaskulární chirurgii (operace cév). [2][7]

2 Frekvenční stabilizace externí kavitou

Oblasti využití laserů se dají rozdělit na dvě kategorie. Do první z nich se řadí například obrábění nebo využití v lékařství. Jsou to především oblasti, kde je potřeba spíše určitý výkon laseru. Na menší změny frekvence se vůbec nebo jen velmi málo bere zřetel. Kdežto na druhé straně barikády stojí aplikace, kde i změna v rámci desítek až stovek GHz (což odpovídá změně vlnové délky o desetiny nanometrů) hraje velikou roli. Jedná se například o interferometrii. Právě v těchto odvětvích nachází uplatnění externí stabilizace, díky které je teoreticky možné levně zmenšit změny vlnové délky i té nejobyčejnější laserové diody.

Téměř všechny způsoby stabilizace frekvence externí kavitou fungují na stejném principu odražení vybrané frekvence zpět do rezonátoru. Níže popisované metody se od sebe liší jen ve způsobu odražení a posilování vybraného modu, ze kterého ovšem plyne několik rozdílných vlastností a možností uplatnění.

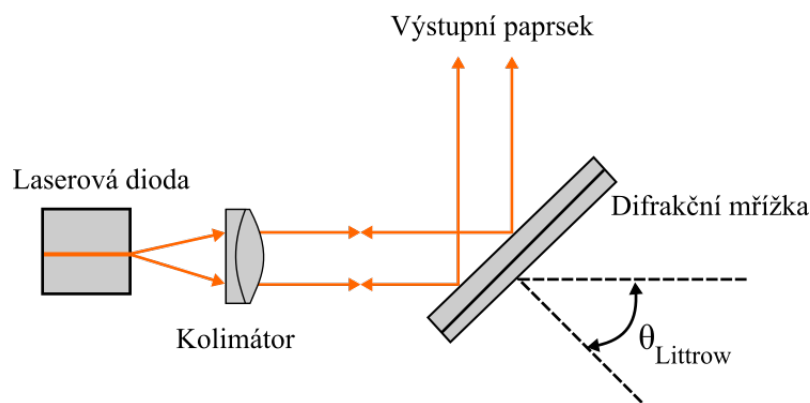
2.1 Plošná difrakční mřížka

Difrakční mřížky využívají jevu difrakce elektromagnetického záření, které zde difraguje na periodicky se opakujících stejně širokých štěrbinách. Vzdálenost, kterou jsou od sebe tyto štěrbininy vzdálené, se nazývá perioda mřížky. Dochází zde k fázové nebo amplitudové modulaci dopadající vlny. Po průchodu vlny jednotlivými štěrbinami, lze každou štěrbinu považovat za nový bodový zdroj vlnění. Platí zde Huygensův princip. Interferenční maxima, která se vytvoří za difrakční mřížkou nebo na stínítku po odrazu od difrakční mřížky, jsou velmi úzká a jejich vzdálenost od sebe je nepřímo úměrná periodě mřížky. Větší perioda tedy znamená menší rozestupy mezi jednotlivými maximy. [3][9][10][11]

Difrakční mřížka může být zhotovena různými způsoby. Jednou z možností je zhotovit transparentní destičku s měnícím se indexem lomu nebo s periodicky proměnnou tloušťkou. V obou těchto uspořádáních se jedná o transmisní mřížku, kde se mění fázi světla. Druhým druhem jsou reflexní difrakční mřížky. Ty jsou

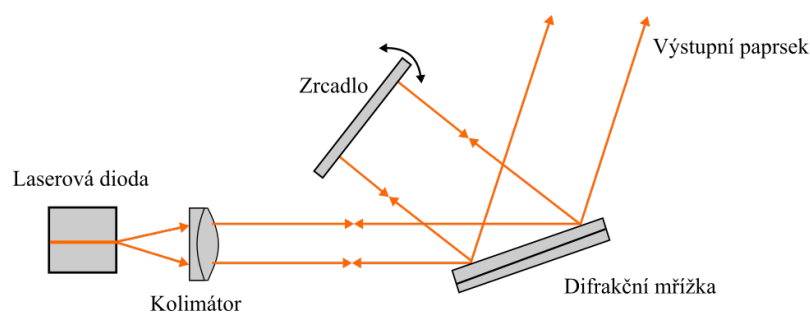
tvořeny lehkou mechanickou periodickou strukturou na tenké vrstvě vyleštěných kovů, nejčastěji se jedná o hliníkovou destičku. [3][10][11]

Littrow konfigurace – Pro použití difrakce při stabilizaci frekvence se využívá polohovatelné difrakční mřížky umístěné do cesty světelného svazku. Natáčením této mřížky, dosahujeme odrazení části paprsku světla s vlnovou délkou, která je určena úhlem natočení difrakční mřížky, zpět do rezonátoru laseru. Tento odražený svazek pomáhá se zesilováním modů v rezonátoru, které se nachází poblíž frekvence odraženého paprsku. Zbytek světla se pod jiným úhlem odráží dále, kde jej pomocí dalších optických prvků můžeme dále upravit nebo využít. Největší nevýhodou této konfigurace je změna směru výstupního paprsku z důvodu natáčení. Tuto nedokonalost lze odstranit přidáním zrcadla do tohoto uspořádání. [12][13]



Obrázek 2.1: Schéma Littrow uspořádání – zpracováno dle [14]

Littman-Metcalf konfigurace – Uspořádání Littman-Metcalf využívá již zmíněné zrcadlo. To je natáčeno tak, aby odrazilo světlo odražené od difrakční mřížky. Tímto uspořádáním se vyhneme závislosti směru výstupního paprsku na natáčení mřížky, kvůli volbě odražené vlnové délky zpět do rezonátoru. Výhodou obou těchto sestavení je možnost měnit hodnotu odražené frekvence. [12][14][15]



Obrázek 2.2: Schéma uspořádání Littman-Metcalf – zpracováno dle [14]

2.2 Braggovy difrakční mřížky v optickém vlákně

Optické vlákno je upraveno, takže se v jeho jádře periodicky mění index lomu. Takto upravené vlákno bude ovlivňovat procházející světlo pouze tehdy, když jádro vlákna bude obsahovat více než tisíc změn indexu lomu. Zároveň musí platit, že rozdíl mezi maximem a minimem je dostatečně veliký. Tyto vlastnosti musí splňovat jakákoliv difrakční mřížka, v případě Braggovy mřížky musíme vzít v potaz ještě tzv. Braggovu podmínku difrakce (vztah 2.1). [11]

$$\lambda = 2 \cdot n \cdot d \quad (2.1)$$

kde:

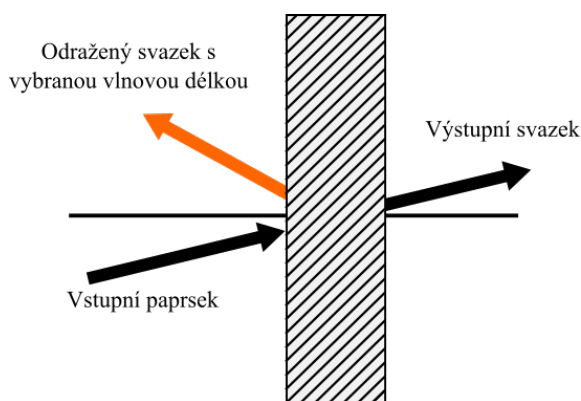
λ = vlnová délka

n = index lomu, kdy dochází k odrazu

d = perioda mřížky

2.3 Objemová difrakční mřížka

Objemové difrakční mřížky mohou být realizované jako reflexní i transmisní. Transmisní řešení není pro tuto práci podstatné, proto bude níže popsán jen princip funkce reflexní objemové difrakční mřížky.



Obrázek 2.3: Schéma funkce objemové difrakční mřížky

Veliká výhoda oproti tenkým difrakčním mřížkám je vysoká selektivita vlnové délky. Objemová difrakční mřížka funguje na podobném principu jako Braggův reflektor. Při její výrobě se nechají na fotocitlivém médiu interferovat dvě koherentní

světelné vlny. Po navedení paprsku do mřížky je část odražena podle Braggovy rovnice (vztah 2.2). Na rozdíl od ostatních difrakčních metod nezávisí vybraná vlnová délka na indexu lomu okolí. Její nevýhoda je možnost přeladění odrážené frekvence jen ve velmi malém intervalu, v porovnání s tenkou difrakční mřížkou. To plyne z vysoké selektivity objemové difrakční mřížky. [16]

$$\lambda = 2 \cdot n \cdot D \cdot \cos(\theta) \quad (2.2)$$

kde:

λ = vlnová délka

n = index lomu, kdy dochází k odrazu

D = hustota mřížky

θ = úhel pootočení mřížky

3 Vlastní realizace ECDL

Cílem experimentálního uspořádání bylo stabilizovat laserovou diodu s Fabry-Perotovým rezonátorem. Většina prací, které se zabývají problematikou ECDL, používá freespace uspořádání, nepoužívají tedy optická vlákna. Z tohoto důvodu bylo vhodné zvolit laserovou diodu s vláknový výstupem a ověřit zda jí lze také externě stabilizovat. Další výhodou je možnost snadného odpojení od externí kavity a následné připojení jiné diody s vláknovým výstupem.

3.1 Postředky pro realizaci

3.1.1 Laserová dioda

Ve vlastní realizaci ECDL byla jako zdroj laserového záření použita laserová dioda od firmy QPhotonics, LLC, přesněji diodu s označením QFLD-780-10S.

Test conditions: temperature 25°C, power 10mW, CW operation

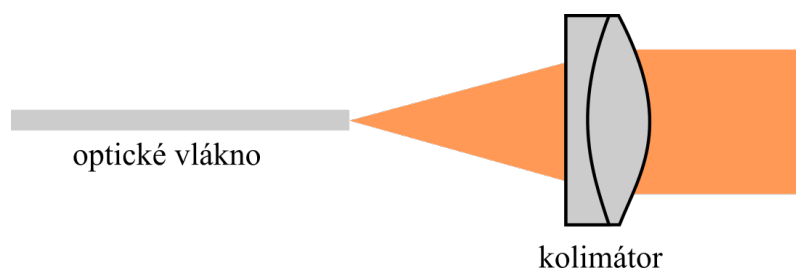
Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Optical power from pigtail	P_f	8	10	15	mW
Wavelength	λ_c	770	780	785	nm
Wavelength v/s temperature coefficient	$d\lambda/dT$		0.3		nm/°C
Spectral linewidth (FWHM)	$\Delta\lambda$		1.0	2.0	nm
Forward current	I_f		100	150	mA
Threshold current	I_{th}		50		mA
Forward voltage	V_f		1.8	2.1	V
Rise time in pulse mode	t_r		0.5		ns
Monitor current @ $V_{rPD}=5V$	I_m	0.02			mA
TEC current	I_{TEC}			0.5	A
Thermistor resistance @ 25°C		9.5	10.0	10.5	KOhm
Storage temperature	T_{sta}	-40		70	°C
Operating case temperature	T_c	0		60	°C
PD reverse voltage	V_{rPD}			20	V
Lead soldering temperature @ 10s	-			260	°C

Obrázek 3.1: Základní specifikace diody QFLD-780-10S, převzato z [17]

3.1.2 Kolimátor

Světelný svazek, který prochází jednovidovým vláknem, již na jeho konci nemá podobu úzkého svazku, ale vychází z něj v podobě stále se rozšiřujícího kužele.

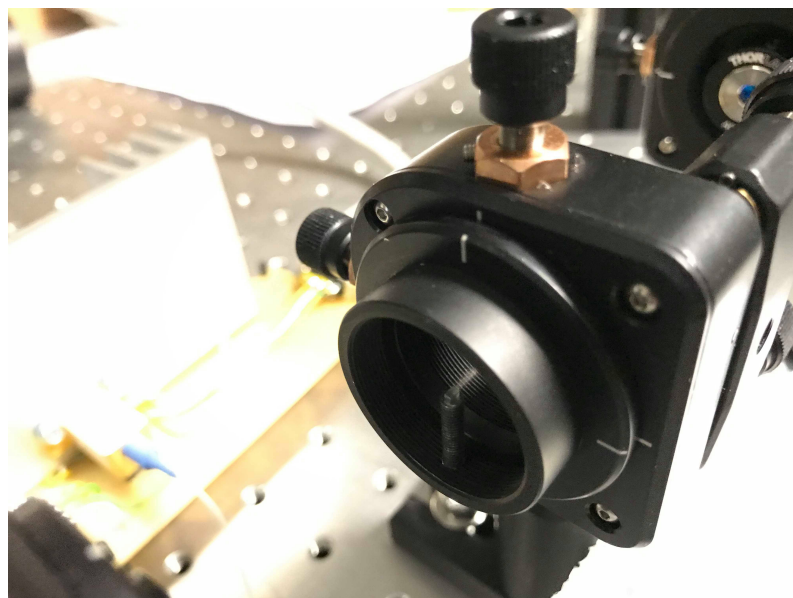
Proto je nutné jej tzv. zkolimovat, aby se opět jednalo o svazek s rovinnou vlnou. K tomuto účelu lze využít jednoduchý dublet (obrázek 3.2), který tvoří dvě čočky. Světelný paprsek vychází z kolimátoru v rovnoběžném svazku. [18]



Obrázek 3.2: Princip funkce kolimátoru – zpracováno dle [18]

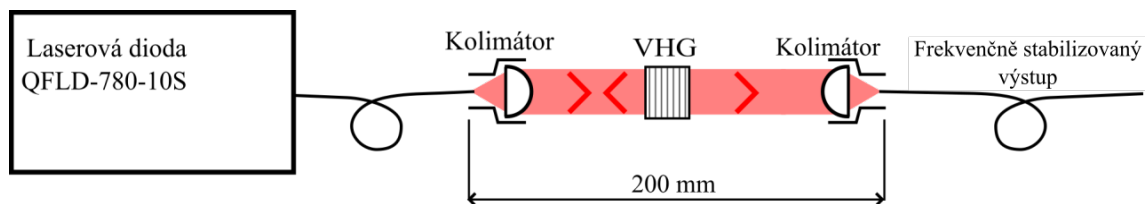
3.1.3 Objemová difrakční mřížka

Jako částečně refrakční prvek, který odráží část požadované frekvence zpět do rezonátoru laserové diody, byla použita holografická objemová mřížka *Power Locker*[®] od firmy Ondax, Inc. Anglicky označována jako Volume Holographic Grating, zkratka VHG. S modelovým označením PLR-780.24nm-35-1-1-1.5, která je vyrobena tak, aby odrážela 35 % výkonu světla o vlnové délce $\lambda = 780,24$ nm ve vakuu. Pokud se přesuneme do prostředí tvořeného vzduchem, odrážená vlnová délka se změní na $\lambda = 780,018$ nm. Její spektrální šířka z hlediska selektivity vlnové délky je 0,130 nm. Rozměry objemového hologramu jsou 1 mm x 1 mm x 1,5 mm.



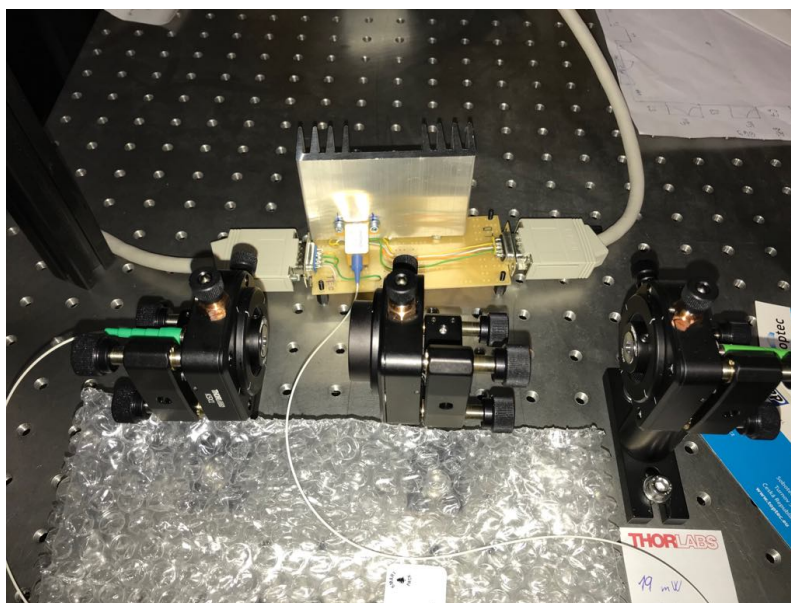
Obrázek 3.3: Objemová difrakční mřížka od firmy Ondax, Inc.

3.2 Experimentální uspořádání



Obrázek 3.4: Schéma experimentálního uspořádání

Pro experimentální sestavení ECDL byla jako stabilizační prvek vybrána objemová holografická mřížka, především z důvodu relativně snadného seřízení. Svoji roli ve výběru hrála také dostupnost, jak finanční tak i logistická. Celý setup byl poskládán na optickém stole a v průběhu měření zakrýván hliníkovou fólií, z důvodu co největší eliminace proudícího vzduchu.



Obrázek 3.5: Setup s VHG a délkou kavity 200 mm

4 Experimentální výsledky

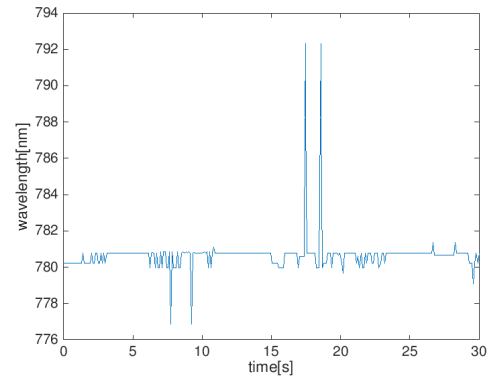
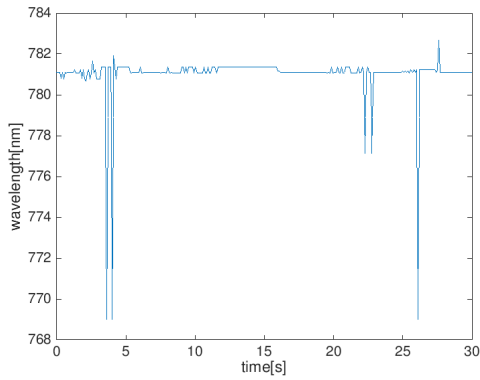
Aby bylo možné externě stabilizovat výstupní laserový svazek, je nutné nejdříve zajistit, že laserová dioda emituje záření s frekvencí, kterou je objemová difrakční mřížka schopná odrazit. Toho lze dosáhnout správnou volbou pracovního bodu laserové diody. Především jde o nastavení teplotní stabilizace na takovou hodnotu, aby rezonátor, který se zahříváním roztahuje, měl vyhovující délku pro tvorbu stojatého vlnění dané frekvence.

Při všech měřeních se proud procházející diodou řídil pomocí laser diode controller LDC 202 C od firmy ThorLabs, Inc. Pro účely teplotní stabilizace byla laserová dioda vybavena $10\text{k}\Omega$ termistorem a Peltierovým článkem, který byl řízen temperature controller TED 200 C také od firmy ThorLabs, Inc. Jelikož bylo nutné určit pouze vhodný pracovní bod, stačilo teplotu měřit v hodnotách odporu termistoru (jednotky $\text{k}\Omega$) a pro další práci s daty nebylo nutné kalibrovat hodnotu odporu termistoru na teplotu laserové diody ve stupních Celsia. Dále v práci je teplota uváděna jen v hodnotách odporu termistoru. Pro všechny experimenty byla vlnová délka měřena vlnoměrem od firmy HighFinesse GmbH, konkrétně Wavelength meter WS-6.

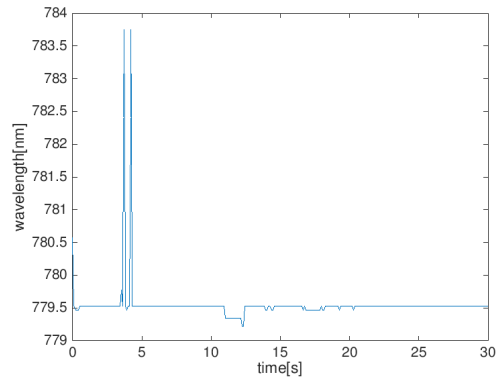
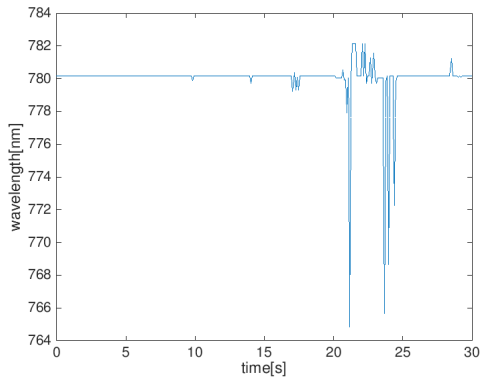
4.1 Charakteristika laserové diody

4.1.1 Teplotní závislost laserové diody

Pro správné vyhodnocení parametrů diody bylo potřeba změřit teplotní závislost vlnové délky samotné laserové diody. Pro tento účel bylo vlákno, které vede světelný svazek přímo od diody, přivedeno přímo do vlnoměru. Teplotní závislost stačilo změřit pouze na malém intervalu hodnot od $7400\ \Omega$ do $8600\ \Omega$. Při dalším zvyšování teploty by rezonátor již neobsahoval potřebný mód, který by interagoval s objemovou difrakční mřížkou. Stejně tak i při dalším snižování teploty. Na průbězích je parné, že se rostoucím odporem termistoru (klesající teplota) se snižuje vlnová délka centrálního modu – zkrácení rezonátoru.



Obrázek 4.1: Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 7400 Ω Obrázek 4.2: Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 7800 Ω

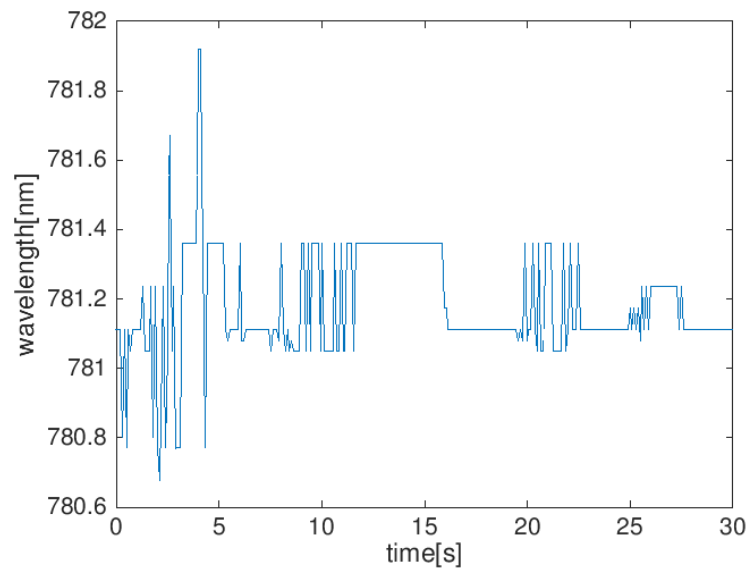


Obrázek 4.3: Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 8200 Ω Obrázek 4.4: Průběh vlnové délky pro hodnotu odporu termistoru – 8600 Ω

Výše jsou zobrazeny čtyři průběhy vlnové délky, které byly měřeny při proudu 110 mA a různých hodnotách odporu termistoru umístěného v pouzdru diody. Čas, po který byla vlnová délka měřena, byl 30 sekund. I takto krátký interval stačil na zaznamenání změny vlnové délky na základě změny centrálního modu v rezonátoru. Pro různé kombinace proudu a teplotní stabilizace vykazovala laserová dioda QFLD-780-10S tyto změny vlnové délky. Tímto měřením byl určen pracovní bod laserové diody, který se nachází mezi 7800 Ω a 8000 Ω .

Na průběhu 4.1 jsou vidět tři krátké, ale zato znatelné poklesy vlnové délky. Vzhledem k tomu, že se jedná o diodu jejíž vlnová délka má být typicky 780 nm, lze na základě vlastností rezonátoru (viz kapitolu 1.2.2) považovat, že krátkodobé změny vlnové délky větší než 10 nm jsou chybou měření. Po odstranění těchto odlehých

hodnot získáme charakteristiku vlnové délky, na které jsou vidět veliké a především velmi časté změny vlnové délky (mod hopping) (obrázek 4.5).



Obrázek 4.5: Průběh vlnové délky diody QFLD-780-10S při $I = 110 \text{ mA}$, $R = 7600 \Omega$

4.1.2 Výstupní výkon laserové diody

Dalším krokem bylo změření výkonu diody QFLD-780-10S, při změně proudu a teploty. K tomu byl použit přístroj PM100D od firmy ThorLabs, Inc., kde byl opět světelný svazek přiveden přímo na měřič výkonu pouze s použitím vlákna vystupujícího z diody. Naměřená data jsou zobrazena v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Výkon laserové diody QFLD-785-10S

I = 70 mA		I = 80 mA		I = 90 mA		I = 100 mA		I = 110 mA	
R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]
7400	3,956	7400	8,17	7400	12,11	7400	16,02	7400	19,69
7600	4,466	7600	8,63	7600	12,65	7600	16,56	7600	20,18
7800	4,866	7800	9,01	7800	13,05	7800	17,06	7800	20,83
8000	5,262	8000	9,48	8000	13,50	8000	17,55	8000	21,20
8200	5,653	8200	9,85	8200	13,98	8200	17,81	8200	21,69
8400	6,013	8400	10,19	8400	14,29	8400	18,23	8400	21,98
8600	6,367	8600	10,55	8600	14,62	8600	18,56	8600	22,46

Po přivedení laserového svazku optickým vláknem do základního setupu (obrázek 3.5), bylo měření výkonu provedeno znovu, ovšem v tomto případě již světelný svazek musel projít několika optickými prvky. V tomto případě se jednalo o základní sestavu tedy vlákno – kolimátor – vzduch – kolimátor – vlákno. Výstupní výkon

(tabulka 4.2) byl dle očekávání menší než v předchozím měření. Za ztrátu výkonu mohou úbytky v optických vláknech a také nedokonalé navedení svazku z jednoho kolimátoru do druhého.

Tabulka 4.2: Výkon laserové diody QFLD-785-10S – základní setup (obrázek 3.5)

I = 70 mA		I = 80 mA		I = 90 mA		I = 100 mA		I = 110 mA	
R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]	R [Ohm]	P [mW]
7400	3,225	7400	6,78	7400	10,17	7400	13,28	7400	16,17
7600	3,752	7600	7,13	7600	10,47	7600	13,55	7600	16,58
7800	4,015	7800	7,52	7800	10,76	7800	13,89	7800	17,08
8000	4,375	8000	7,73	8000	11,15	8000	14,29	8000	17,31
8200	4,604	8200	8,12	8200	11,38	8200	14,59	8200	17,60
8400	4,971	8400	8,32	8400	11,65	8400	14,94	8400	17,93
8600	5,224	8600	8,66	8600	11,92	8600	15,11	8600	18,23

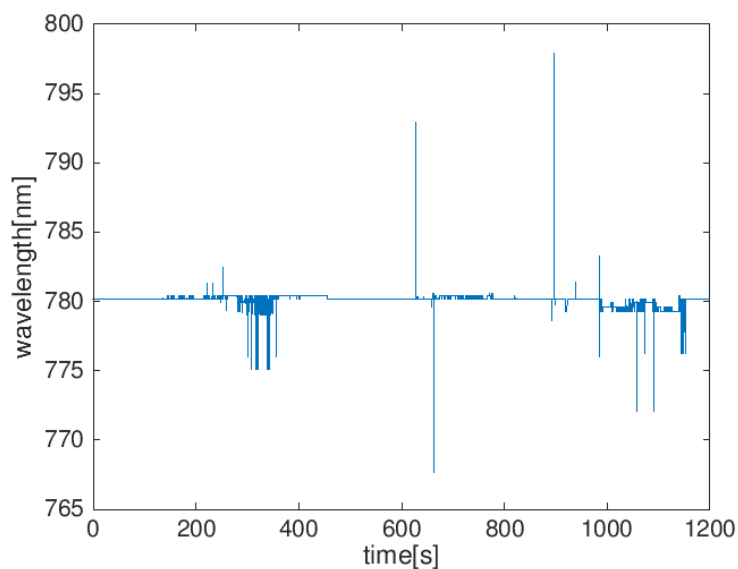
4.2 Frekvenčně stabilizovaný výstup

Jako další následovalo měření s vloženou objemovou holografickou difrakční mřížkou (VHG). Funkcí této mřížky je odrazet část výstupního výkonu laserového svazku o vlnové délce, která je výrobcem dokumentovaná na hodnotě 780.018 nm a zbytek propustit dál. Takto odražený světelný svazek se vrací zpět do rezonátoru a posiluje tento centrální mod. (viz kapitolu 3.1.3).

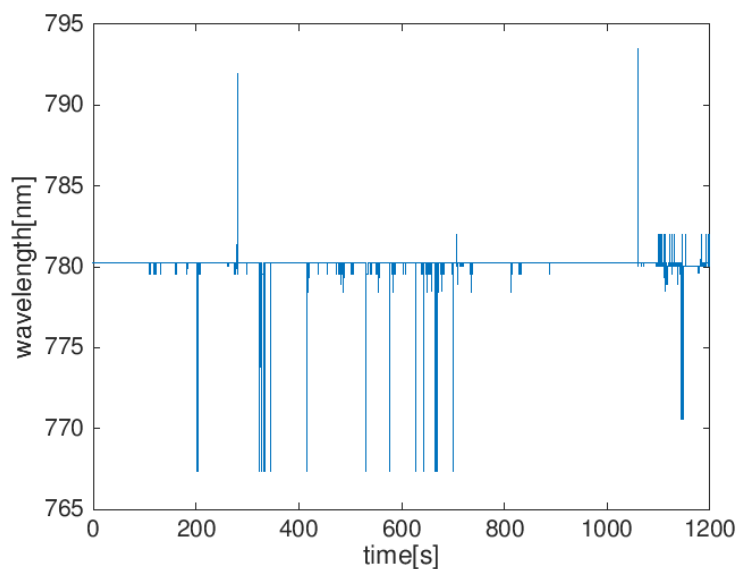
Seřízení VHG probíhalo pomocí jejího natáčení, dokud se nepodařilo zachytit odraz na stínítku před kolimátorem. Toto stínítko bylo umístěné, tak aby bylo co nejbližší kolimovaného laserového svazku, vycházejícího ze středu kolimátoru, ale zároveň aby ho nepřekrývalo. Pozorovaný odraz od VHG zachycený na stínítku, měl zajímavou vlastnost. I pouhým okem byly zřetelně vidět časté změny intenzity odraženého svazku. Tyto změny byly způsobené změnami centrální vlnové délky vycházející z laserové diody, díky kterým se měnil poměr odraženého modu ku ostatním. Takto zachycený laserový svazek se další jemným natočením navedl přímo do kolimátoru.

Měření potvrdilo teoretický předpoklad o frekvenční stabilizaci. Průběh vlnové délky byl zaznamenávám po dobu 20 minut. Vlnová délka po dobu měření byla výrazně lépe stabilizována než v případě měření bez hologramu. Ovšem i přes tuto stabilizaci není dioda QFLD-785-10S s externí kavitou v tomto uspořádání vhodná pro využití v interferometrii. Během měření se ze zhruba 50 % času vlnová délka držela na hodně 780.02 nm, tedy na vlnové délce kterou odráží holografická mřížka. Ovšem ve zbytku měření vlnová délka rychle přeskakovala mezi dalšími pěti mody,

viz obrázek 4.6 a obrázek 4.7. Důvodem těchto rychlých změn by mohla být velikost světelného svazku, který je větší než velikost hrany objemové difrakční mřížky. Další důvod tohoto rozkmitání může být špatně navedený odražený paprsek od VHG do kolimátoru. Tím pádem by se část odraženého paprsku ztratila v kolimátoru a zpět do rezonátoru by se dostala jen malá část záření. Ta by nebyla schopná zcela potlačit ostatní mody v rezonátoru nebo by doba na ustálení byla nepřiměřeně dlouhá.



Obrázek 4.6: Průběh vlnové délky po vložení hologramu při 7900Ω a 97.74 mA

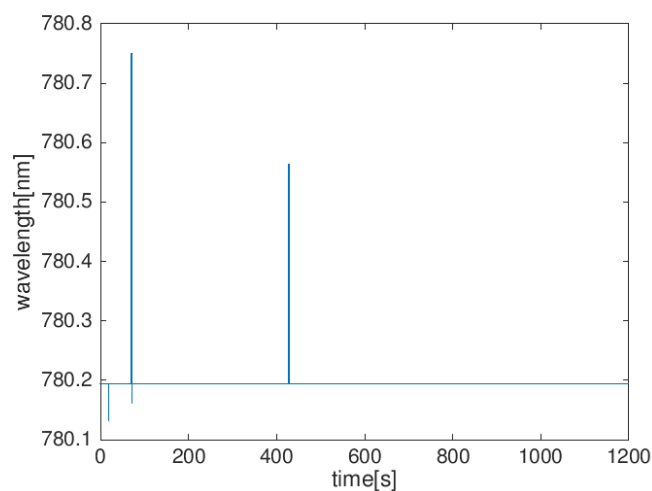


Obrázek 4.7: Průběh vlnové délky po vložení hologramu při 7950Ω a 100 mA

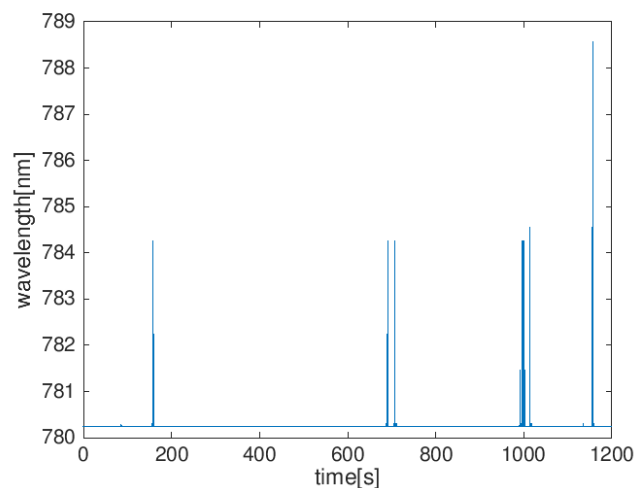
4.2.1 Měření po vložení apertury před hologram

Šířku světelného svazku lze ovlivnit aperturou, která zachytí část svazku jdoucího mimo difrakční mřížku. Díky tomu nedochází k odrazům od hran objemové difrakční mřížky, od kterých může být odráženo zpět do kolimátoru záření i o jiné vlnové délce. Toto omezení způsobí navedení celého oříznutého světelného svazku do objemové difrakční mřížky za cenu snížení intenzity výstupního svazku.

Měření opět probíhalo po dobu 20 minut. Na dvou průbězích (viz obrázky 4.2 a 4.9) je patrné, že se vlnová délka opět lépe stabilizovala. Stále jsou zde ale výkyvy vlnové délky, které jsou výrazně méně časté než v předchozím měření.



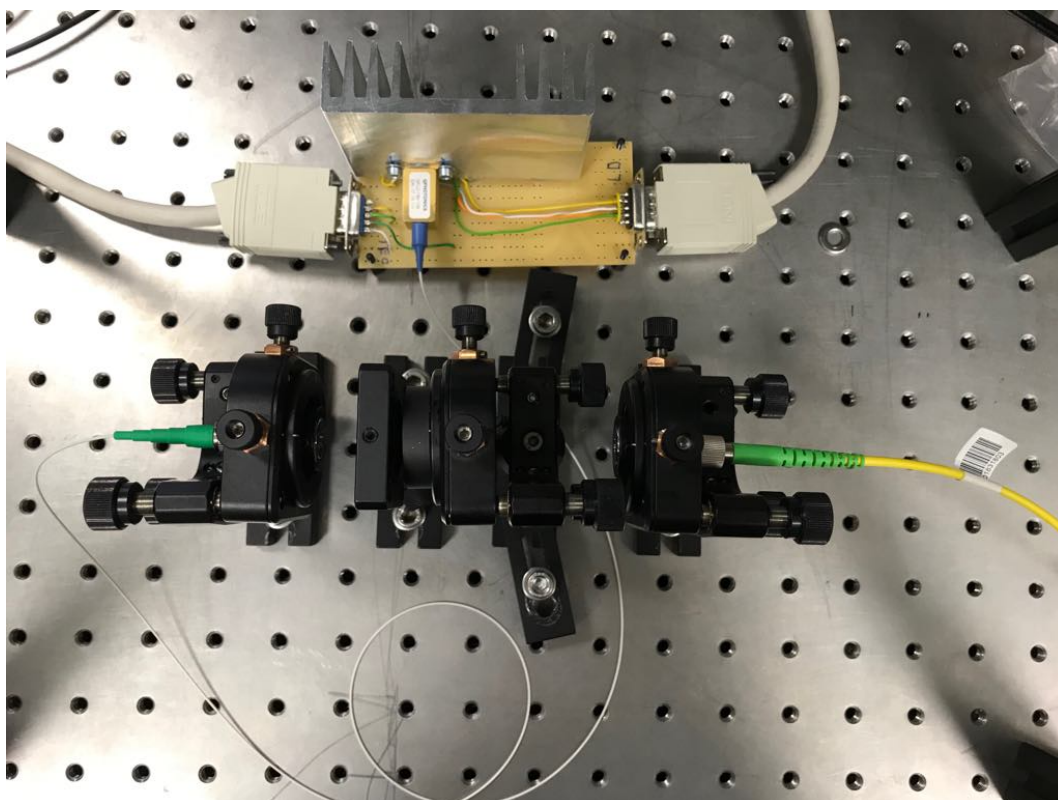
Obrázek 4.8: Průběh vlnové délky po vložení apertury a hologramu při 7850 Ω a 101.8 mA



Obrázek 4.9: Průběh vlnové délky po vložení apertury a hologramu při 7900Ω a 102 mA

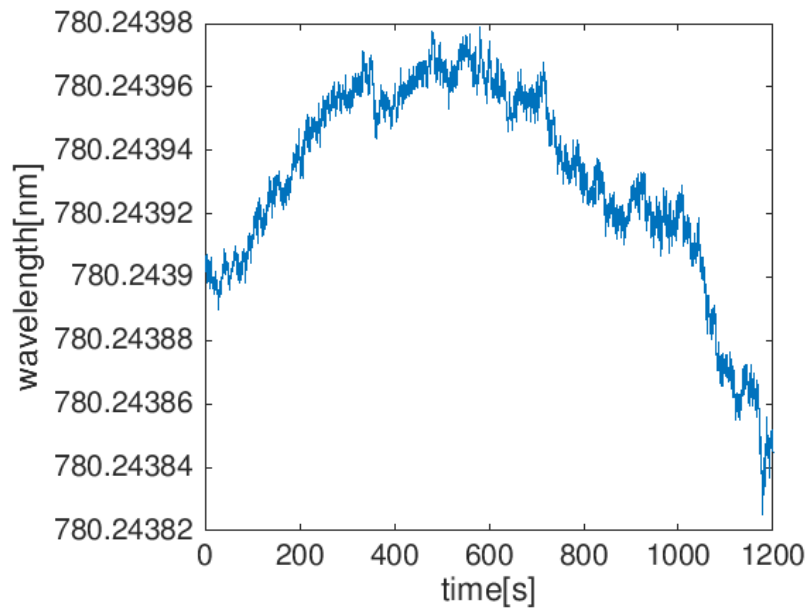
4.2.2 Zkrácení externí kavity

Další možností jak zlepšit frekvenční stabilizaci laserové diody QFLD-780-10S bylo upravit délku externí kavity. Její přílišná velikost, která u předchozího sestavení byla 200 mm , mohla mít za následek proudění vzduchu mezi komponentami a tím ovlivňovat vlnovou délku. Toto proudění bylo značně redukováno uzavřením celého uspořádání do krabice, avšak zcela se ho zbavit nelze. Pro usnadnění seřízení celé sestavy, bylo zkrácení provedeno v rámci rozmístění závitů v optickém stole. I přes toto omezení bylo možné snížit velikost externí kavity na 90 mm .

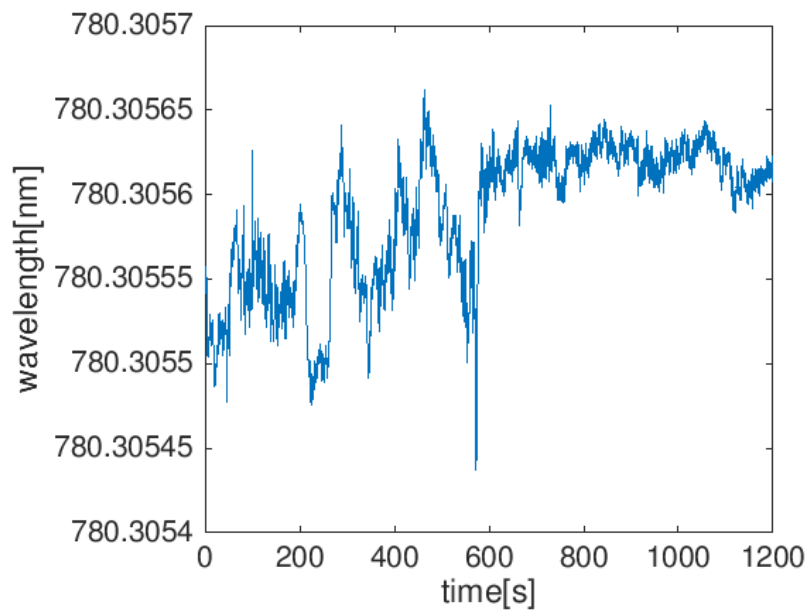


Obrázek 4.10: Setup po zkrácení kavity na 90 mm.

Po zkrácení následovalo seřízení VHG stejným postupem, jako v předchozím nastavování setupu. Při správném navedení odraženého paprsku zpět do kolimátoru a dostatečně dlouhé době na ustálení modu v rezonátoru, bylo dosaženo mnohonásobně lepší frekvenční stabilizace než při použití samotné laserové diody. Vlnová délka byla měřena několikrát po dobu 20 minut, při nejstabilnějším průběhu byla změna vlnové délky $\Delta\lambda = 0,00016$ nm (obrázek 4.11). Z tohoto měření je také vidět, že v rezonátoru dominuje mod, který odráží VHG. Ovšem ne všechna měření měla takto dobré výsledky, pokud se vlnová délka měřila hned po zjustování VHG, docházelo k větším změnám vlnové délky $\Delta\lambda = 0,0003$ nm. Především ale v rezonátoru převládá jiný mod, než který odráží VHG zpět do rezonátoru (obrázek 4.12).



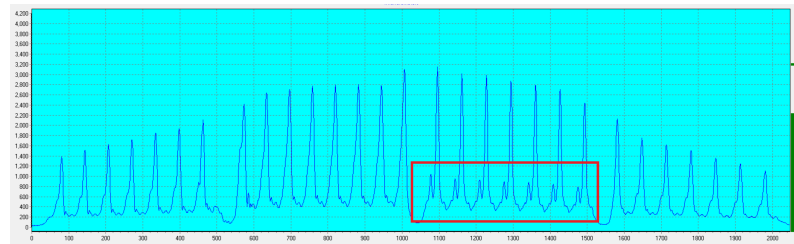
Obrázek 4.11: Průběh vlnové délky po třiceti minutách na ustálení.



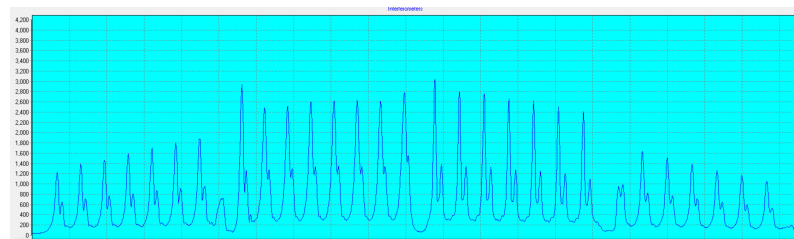
Obrázek 4.12: Průběh vlnové délky ihned po seřízení VHG.

Na interferogramu z vlnoměru (obrázek 4.13) je v červeném rámečku zvýrazněn mod o $\lambda = 780.25$ nm. Po zhruba 15 minutách tento mod v rezonátoru převládá, vlnová délka se ustálila na $\lambda = 780.2438$ nm (obrázek 4.14). Je zde také vidět průběh vlnové délky po dobu 15 minut. Bohužel se vlnová délka v posledních minutách rozhodla. Jeden z možných důvodů proč k tomu došlo může být opět proudění vzduchu v externí kavitě. Ovšem i přes tyto výkyvy byla vlnová délka laserové

diody QFLD-780-10S stabilní na čtvrtém desetinném místě. Takto dobré frekvenční stabilizace, by bez externí kavity s VHG nebylo možné dosáhnout viz obrázky 4.1 až 4.5.



Obrázek 4.13: Záznam z řádkového detektoru ve vlnoměru ihned po seřízení VHG



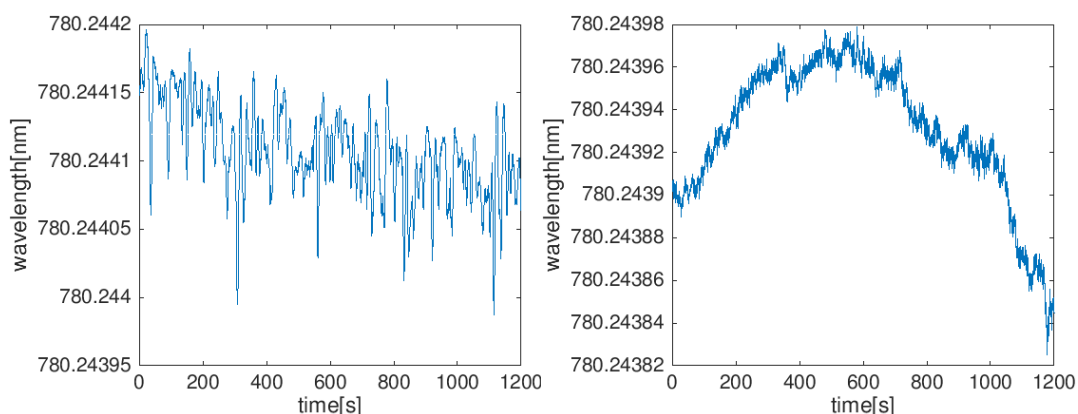
Obrázek 4.14: Záznam z řádkového detektoru ve vlnoměru po třiceti minutách na ustálení

5 Srovnání s komerčním řešením

Pro porovnání vlastností laserové diody QFLD-780-10S byla použita stabilní laserová DFB dioda EYP-DFB-0780-00080-1500-TOC03-0002 od firmy Eagleyard Photonics GmbH. Ta se nachází v naprosto jiné cenové kategorii (tabulka 5.1), především proto že má velmi dobrou koherenční délku, přeladitelnou a stabilní vlnovou délku (obrázek 5.1). Tyto vlastnosti umožňují využití takovéto laserové diody pro interferometrická měření (viz kapitolu 1.4.1). Změna vlnové délky u DFB diody se pohybuje v rámci $\Delta\lambda = 0,00025$ nm, tudíž frekvenční stabilita je téměř shodná s laserovou diodou QFLD-780-10S spolu se správně seřízeným hologramem (tabulka 5.1).

Tabulka 5.1: Porovnání DFB diody s ECDL uspořádáním, souhrnné ceny poskytl Centrum TOPTEC – Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.

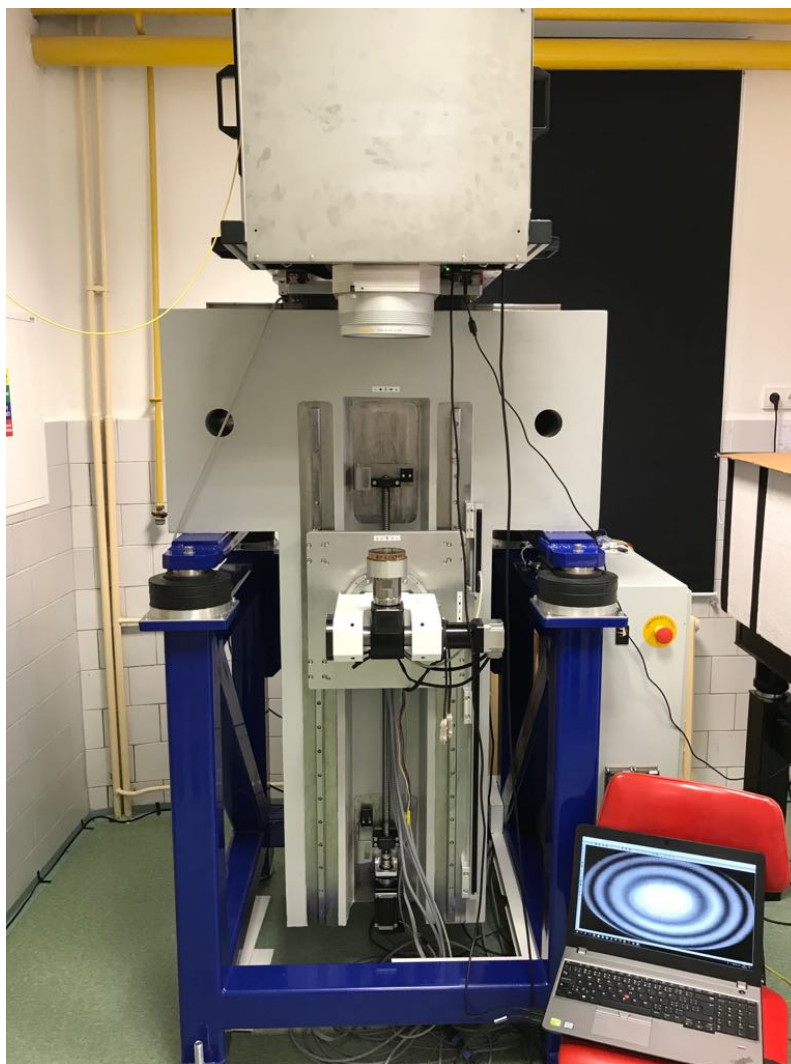
	Δ [nm]	cena [Kč]
ECDL	0,00016	50 000
DFB	0,00025	160 000



Obrázek 5.1: Záznam průběhu vlnové délky DFB diody

Obrázek 5.2: Záznam průběhu vlnové délky ECDL uspořádání

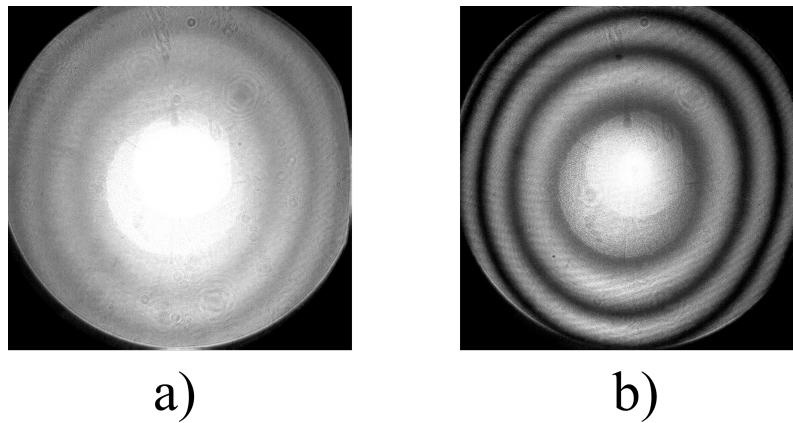
Obě laserové diody byly připojeny k experimentálnímu Fizeau interferometru (obrázek 5.3) určeného pro měření tvaru optických ploch. Na interferometru byla nasazena 6" Fizeau transmisní sféra s F číslem 7,3. Měřená sférická plocha měla poloměr 637,971 mm. Tato sférická plocha vykazovala lehký astigmatismus. Její umístění oproti Fizeau interferometru bylo nepatrně defokusem oproti konfokální poloze sférické čočky a to z důvodu lepšího pozorování interferenčního obrazce. Kavita interferometru mezi měřenou a Fizeau plochou byla 430 mm, to činí rozdíl optických drah rovný 860 mm.



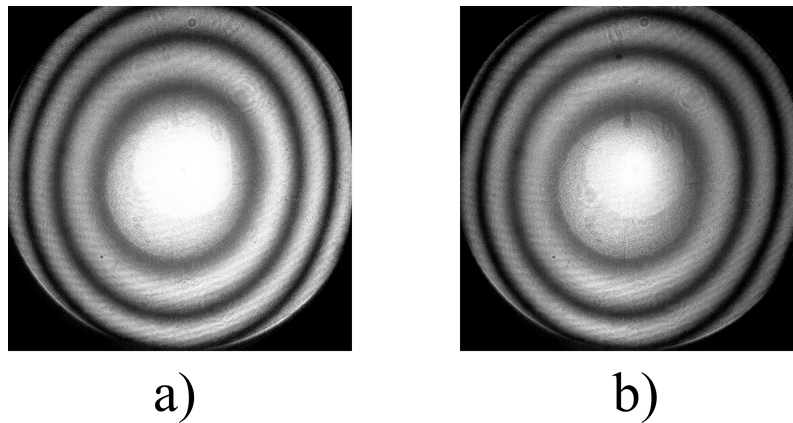
Obrázek 5.3: Experimentální Fizeau interferometr

Nejprve byla vstup interferometru přivedena Fabry-Perotova dioda bez vložené objemové difrakční mřížky. V rámci expozice jednoho snímku kamery byl patrný špatný kontrast interferogramu. Ten byl způsoben přeskokováním frekvence lasero-

vého svazku. Pro další měření byla připojena k interferometru dioda DFB. Měření tvaru plochy probíhalo bez problémů, právě díky výše zmíněným vlastnostem. Po připojení laserové diody QFLD-780-10S s objemovou difrakční mřížkou bylo znát mírné zhorší oproti DFB diodě. Ovšem vlnová délka se při měření ukázala být dostatečně stabilní na vytvoření solidního interferenčního obrazce. Tato vlastnost byla patrná ze stále stejného uspořádání soustředných kružnic na interferometru. Pokud by stabilita nebyla dostatečná, tak by se proužky interferogramu, reprezentující maxima a minima, stále posouvaly. Takovýto interferogram by nebyl dostatečně vypovídající a k přesnému měření by se nedal vůbec použít.



Obrázek 5.4: Interferogram po připojení QFLD-780-10S – a) bez VHG, b) s VHG



Obrázek 5.5: a) interferogram po připojení DFB laseru, b) interferogram po připojení QFLD-780-10S s VHG

Závěr

Cílem této práce bylo zrealizovat experimentální uspořádání ECDL, ověřit jeho funkčnost a porovnat kvalitu výstupního laserového svazku s jinou komerčně dostupnou laserovou diodou. Jako stabilizační prvek frekvence laserového svazku byla vybrána objemová difrakční mřížka a to ze dvou hlavních důvodů. Jednalo se o její relativně snadné seřízení, ale především šlo o její dostupnost. Zároveň nevýhoda objemové difrakční mřížky v podobě možnosti měnit odráženou frekvenci jen na malém intervalu, nebyla pro aplikaci v interferometrickém měření překážkou.

Samotná laserová dioda bez stabilizujícího prvku vykazovala silnou nestabilitu a to i na velmi krátkém časovém intervalu. Při prvních měřeních s vloženou objemovou difrakční mřížkou při délce kavity 200 mm docházelo stále k velkým výkyvům ve vlnové délce, avšak v porovnání se samotnou laserovou diodou v mnohem delším časovém horizontu. Tyto výkyvy se následně povedlo omezit vložением apertury, jejíž úkol měl být zmenšit velikost paprsku, který dopadá na difrakční mřížku, tak aby nedocházelo k parazitním odrazům na jejích hranách. I toto řešení se ukázalo jako nedostatečné.

Dále bylo provedeno omezení proudícího vzduchu skrze externí kavitu uzavřením do ochranného boxu a zkrácením kavity na 90 mm. Po opětovném seřízení difrakční mřížky a dostatečně dlouhé době na ustálení v rámci desítek minut byly naměřeny výsledky srovnatelné se stabilitou komerčně dostupné DFB diody. Frekvence výstupního laserového svazku se jevila velmi stabilní a tomu odpovídala i vlnová délka, která kolísala v řádu stovek femtometrů. Cena DFB diody je však přibližně třikrát vyšší. Díky stabilizaci Fabry-Perotovy diody pomocí objemové difrakční mřížky je možné snížit náklady na přesná interferometrická měření.

Po připojení na Fizeau interferometr bylo možné provádět interferometrická měření. Díky dobré frekvenční stabilizaci byly na obrazu z kamery, umístěné v interferometru, vidět dobře čitelné interferogramy. Externí frekvenční stabilizací levné Fabry-Perotovy laserové diody bylo dosaženo jejího možného uplatnění ve velmi přesných metrologických aplikacích.

Literatura

- [1] KOECHNER, Walter. *Solid-state laser engineering*. 3rd compl. rev. and updated ed. Berlin: Springer-Verlag, 1992. Springer series in optical sciences. ISBN 3-540-53756-2.
- [2] SVELTO, Orazio a D. C. HANNA. *Principles of lasers*. 4th ed. New York: Plenum Press, c1998. ISBN 978-0-306-45748-7.
- [3] SALEH, Bahaa E. A a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of photonics*. New York: Wiley, c1991. ISBN 9780471839651.
- [4] INDRA, Jaroslav. *Nekonvenční technologie laserového řezání*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Karel Osička.
- [5] KAŠTIL, Petr. *Pevnolátkový laser čerpaný laserovou diodou*. Olomouc, 2009. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce František Petráš.
- [6] File:Lasercons.svg – Wikimedia Commons. [online]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lasercons.svg>
- [7] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
- [8] KESL, Jan. *Elektronika: učebnice : základní studijní materiál pro střední školy*. 2., aktualiz. a rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-143-8.
- [9] Ohyb světla na mřížce :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. Copyright © 2006 [cit. 24.04.2019]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/461-ohyb-svetla-na-mrizce>
- [10] FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. Havlíčkův Brod: Fragment, 2000. ISBN 80-7200-405-0.
- [11] RP Photonics Encyclopedia – fiber Bragg gratings, FBG, index modulati-

- on, filters, fiber-optic sensors. *RP Photonics Consulting GmbH – technical consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software; encyclopedia and buyer’s guide* [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH [cit. 24.04.2019]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html
- [12] DUARTE, F. J. *Tunable laser applications*. Third edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016]. Optical science and engineering (Boca Raton, Fla.). ISBN 1482261065.
- [13] HAWTHORN, C. J., K. P. WEBER a R. E. SCHOLTEN. *Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam*. Review of Scientific Instruments [online]. 2001, 72(12), 4477-4479 [cit. 2019-04-23]. DOI: 10.1063/1.1419217. ISSN 0034-6748. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1419217>
- [14] WANG, Wenbo, Arkady MAJOR a Jitendra PALIWAL. Grating-Stabilized External Cavity Diode Lasers for Raman Spectroscopy—A Review. *Applied Spectroscopy Reviews* [online]. 2012, 47(2), 116-143 [cit. 2019-04-24]. DOI: 10.1080/05704928.2011.631649. ISSN 0570-4928. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/05704928.2011.631649>
- [15] Karen Liu and Michael G. Littman, *Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers*. Opt. Lett. 6, 117-118 (1981)
- [16] *Optics communications.*, Amsterdam: Elsevier, 2009, 2009(282). ISSN 0030-4018.
- [17] [online]. Dostupné z: <http://www.qphotonics.com/Single-mode-fiber-coupled-laser-diode-10mW-780nm-QFLD-780-10S.html>
- [18] RP Photonics Encyclopedia – fiber collimators, lens, collimated beam, focal length, beam size, single-mode, multimode, insertion loss, angled fiber ends. *RP Photonics Consulting GmbH – technical consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software; encyclopedia and buyer’s guide* [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH [cit. 24.04.2019]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/fiber_collimators.html