

PROUDOVÁ A TEPLOTNÍ STABILIZACE DIODOVÝCH LASEROVÝCH ZDROJŮ PRO UŽITÍ V OPTICKÉ INTERFEROMETRII

Diplomová práce

Studijní program: Studijní obor: Autor práce: Vedoucí práce:

N2612 - Elektrotechnika a informatika 3906T001 - Mechatronika **Bc. Michal Kohl** Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





CURRENT AND TEMPERATURE STABILIZATION OF LASER DIODE SOURCES FOR OPTICAL INTERFEROMETRY

Diploma thesis

Study programme: Study branch: Author: Supervisor:

N2612 - Elektrotechnika a informatika 3906T001 - Mechatronika **Bc. Michal Kohl** Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	Bc. Michal Kohl
Osobní číslo:	M12000254
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Mechatronika
Název tématu:	Proudová a teplotní stabilizace diodových laserových zdrojů pro užití v optické interferometrii
Zadávající katedra:	Ústav mechatroniky a technické informatiky

Zásady pro vypracování:

- 1. Prostudujte principy přesných proudových zdrojů a teplotní stabilizace pro laserové diody.
- 2. V nově vyvíjeném přesném proudovém zdroji navrhněte a realizujte jednotku napájecích zdrojů a spolupracujte na vývoji a testování ostatních komponent proudového zdroje (ADC, DAC, teplotní stabilizace, ...).
- 3. Změřte a porovnejte vlastnosti dostupných komerčních proudových zdrojů a nově vyvíjeného zdroje.
- 4. Na základě měření definujte parametry proudových zdrojů pro užití v optické interferometrii při výrobě asférických čoček.

Rozsah grafických prací:

dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- Vrbová, M.: Lasery a moderní optika. BEN, Praha 2014, ISBN 80-85849-56-9.
- [2] Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. BEN, Praha, 2004, 159 s. ISBN 80-730-0110-1.
- [3] Kopecký, V.: Laserová enemometrie v mechanice tekutin, TRIBUN EU, Brno, ISBN 978-80-7399-357-3.

Vedoucí diplomové práce:

Konzultant diplomové práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky
Ing. Petr Vojtíšek
ÚFP AV ČR, v.v.i.

Datum zadání diplomové práce: Termín odevzdání diplomové práce:

10. října 2014 15. května 2015

prof. Ing. Václav Kopecký,

děkan

V Liberci dne 10. října 2014



doc. Ing. Milan Kolář, CSc. vedoucí ústavu

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

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

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

Datum: 15.5.2015

Podpis:

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost při realizaci konstrukčních prací, měření na proudovém zdroji a sepisování závěrečné zprávy této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svému konzultantovi Ing. Petru Vojtíškovi za cenné připomínky, čas, podporu při měření na zdrojích a vyhodnocování výsledků měření. Děkuji Ing. Vítu Lédlovi, Ph.D. za možnost realizace této diplomové práce v Regionálním centru speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC.

Neméně významný dík patří také mé rodině za podporu během celé doby mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá charakterizací zdrojů od renomovaných výrobců a nově vyvíjeného zdroje pro laserové diody, zejména z hlediska jejich předpokládaného použití s důrazem na dlouhodobou teplotní stabilitu vlnové délky. Tato práce zahrnuje měření stability optického výkonu, vlnové délky, interferenčních proužků a stability průběhu získaného z Fabry-Perotova interferometru. Tato práce je také zaměřena na návrh části proudového zdroje.

Klíčová slova

Fabry-Perotův interferometr, interferenční proužky, laser, laserová dioda, Peltierův článek, proudový zdroj, teplotní stabilizace, vlnová délka

Annotation

The diploma thesis deals with a characterization of power supplies from reputable manufacturers and newly developed power supply for laser diodes, especially in terms of their expected application with an emphasis on a long-term thermal stability of a wavelength. This thesis involves measuring the stability of an optical power, a wavelength, interference fringes and the stability of the signal obtained from the Fabry-Perot interferometer. This thesis is also focused on the design of the part of current power supply.

Keywords

current power supply, Fabry-Perot interferometer, interference fringes, laser, laser diode, Peltier element, temperature stabilization, wavelength

Obsah

Se	ezn	am o	obrázků	10
Se	ezn	am p	použitých symbolů	12
Se	ezn	am p	použitých zkratek	14
Ú	voo	d		15
1		Teo	pretický rozbor	16
	1.	1	Lasery, princip činnosti a jejich dělení	16
	1.2	2	Laserová dioda	20
	1.3	3	Proudové zdroje pro laserové diody	21
	1.4	4	Peltierův článek	22
	1.:	5	Interference vlnění a interferometr	24
		1.5.	1 Proužková viditelnost	25
		1.5.2	2 Fabry-Perotův Interferometr	26
2		Poža	adované parametry proudového zdroje PLCS 100	27
3		Náv	vrh proudového zdroje s teplotní a proudovou stabilizací PLCS 100	28
	3.	1	Schéma proudového zdroje PLCS 100	28
	3.2	2	Spínané zdroje	29
	3.3	3	Plošný spoj proudového zdroje PLCS 100	30
	3.4	4	Návrh čelního a zadního panelu proudového zdroje PLCS 100	30
4		Měř	ření vlastností dostupných komerčních zdrojů a nově vyvíjeného zdroje	31
	4.	1	Měření optického výkonu	31
		4.1.	1 Výsledky měření pro měření optického výkonu	32
		4.1.2	2 Vyhodnocení měření optického výkonu	37
	4.2	2	Měření vlnové délky	39
		4.2.	1 Výsledky měření pro měření vlnové délky	39
		4.2.2	2 Vyhodnocení měření vlnové délky	43
	4.3	3	Měření na Fabry-Perotově interferometru	45
		4.3.	1 Výsledky měření pro měření na Fabry-Perotově interferometru	46
		4.3.2	2 Vyhodnocení měření na Fabry-Perotově interferometru	49
	4.4	4	Měření stability interferenčních proužků	50
		4.4.	1 Výsledky měření pro měření stability interferenčních proužků	52
		4.4.2	2 Vyhodnocení měření interferenčních proužků	54
	4.5	5	Měření optického výkonu a vlnové délky v závislosti na změně proudu a teploty	55
		4.5.	1 Vyhodnocení měření závislosti optického výkonu a vlnové délky na změně	
		prou	udu a teploty	57

5 Náv	od k obsluze PLCS 100	58
5.1	Ovládání zdroje PLCS 100	
5.2	Zapojení výstupních konektorů PLCS 100	60
Závěr		61
Literatur	a	64
Příloha A	A - schéma zdroje	67
Příloha E	3 - ovládací panely	74
Příloha (C - tabulky	75

Seznam obrázků

Obr. 1: Spontánní emise	16
Obr. 2: Absorpce	17
Obr. 3: Stimulovaná emise	17
Obr. 4: a) Optický rezonátor, b) Závislost zisku a ztrát rezonátoru na výkonu	18
Obr. 5: Laserový oscilátor	19
Obr. 6: Laserová dioda QFBGLD-775-5 použitá v této diplomové práci [38]	20
Obr. 7: Ideální zdroj proudu - závislost napětí na proudu	21
Obr. 8: Reálný zdroj proudu - závislost napětí na proudu	21
Obr. 9: Reálný zdroj proudu - náhradní schéma	22
Obr. 10: Peltierův článek	23
Obr. 11: Peltierův modul [19]	23
Obr. 12: Schéma Fabry-Perotova interferometru	26
Obr. 13: Kavita Fabry-Perotova interferometru [26]	27
Obr. 14: Blokové schéma proudového zdroje PLCS 100 zapojeného k laserové diodě	28
Obr. 15: Plošný spoj proudového zdroje s teplotní stabilizací PLCS 100	30
Obr. 16: Blokové schéma zapojení pro měření optického výkonu	32
Obr. 17: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 15	j °C
	32
Obr. 18: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 25	°C
	32
Obr. 19: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 35	; °C
	33
Obr. 20: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 55	; mA
	33
Obr. 21: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 65	; mA
	34
Obr. 22: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 75	mA
	34
Obr. 23: Detail časového vývoje optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdr	ojem
s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 65 mA a teplotě 25 °C	35
Obr. 24: Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky	39
Obr. 25: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 15 °C	40
Obr. 26: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 25 °C	41
Obr. 27: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 35 °C	41
Obr. 28: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 55 mA.	42
Obr. 29: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 65 mA.	42
Obr. 30: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 75 mA.	43
Obr. 31: Blokové schéma pro měření na Fabry-Perotově interferometru	45
Obr. 32: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru pro zdroj PLCS 100 při proud	lu 65
mA a teplotě 25 °C	46
Obr. 33: Blokové schéma zapojení pro měření interferenční struktury	50
Obr. 34: Detailní geometrický popis vzniku interferenční struktury	50
Obr. 35: Ukázka interferenční struktury pro zdroj Thorlabs při napájecím proudu 65 mA a	25
°C	52

Obr. 36: Závislost vlnové délky na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25	°C 55
Obr. 37: Závislost vlnové délky na změně teploty laserové diody při 65 mA	55
Obr. 38: Závislost optického výkonu na změně proudu protékajícího laserovou diodou p	ři 25 °C
	56
Obr. 39: Závislost optického výkonu na změně teploty laserové diody při 65 mA	56
Obr. 40: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 1	67
Obr. 41: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 2	68
Obr. 42: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 3	68
Obr. 43: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 4	69
Obr. 44: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 5	69
Obr. 45: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 6	70
Obr. 46: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 7	70
Obr. 47: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 8	71
Obr. 48: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 9	71
Obr. 49: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 10	72
Obr. 50: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 11	72
Obr. 51: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 12	73
Obr. 52: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 13	
Obr. 53: Čelní panel proudového zdroje PLCS 100	74
Obr. 54: Zadní panel proudového zdroje PLCS 100	74

Seznam použitých symbolů

с	$m \cdot s^{-1}$	rychlost světla
c ₁	$Hz \cdot s^{-1}$	kalibrační konstanta
E ₀₁ , E ₀₂	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
E ₁	J	nižší energetická hladina
E ₂	J	vyšší energetická hladina
E ₂	J	vyšší energetická hladina
F _t	$Hz \cdot s^{-1}$	jakost interferometru a optického záření
FWHM	S	šířka v půlce peaku
h	J·s	Planckova konstanta
Н	m	výška
H _p	V	výška peaku
Ι	A	el. proud
I _{Fmax}	A	maximální propustný proud laserovou diodou
I _i	A	proud tekoucí vnitřním odporem zdroje
I _K	A	zkratovací proud zdroje
I _{th}	A	prahový proud laserové diody v propustném směru
t	S	čas
Т	°C	teplota
T _{min}	°C	minimální teplota laserové diody
T _{max}	°C	maximální teplota laserové diody
u		vlnová funkce
U	V	svorkové napětí zdroje
P _{fmax}	W	maximální výkon laserové diody
Р	W	výkon laserové diody

r	m	poloměr zakřivení zrcadel	
R	Ω	zatěžovací odpor	
R _i	Ω	vnitřní odpor zdroje	
α	0	úhel mezi laserovými paprsky	
θ	°C	teplota laserové diody	
dλ/dT	m/K	teplotní koeficient laserové diody	
dλ/dI	m/A	proudový koeficient laserové diody	
λ _c , λ	т	vlnová délka laserové diody	
ν	Hz	frekvence fotonu	
χ	0	polarizační faktor	
ΔΤ	S	vzdálenost mezi peaky	
Δv	Hz	šířka spektra laserové diody	
Δx	т	pohyb struktury	
Δz	S	pohyb struktury	
Λ	т	perioda interferenční struktury	

Seznam použitých zkratek

A/D	analogově-digitální převodník		
APC	druh optického vlákna		
CorelDRAW X7	software pro grafické návrhy		
D/A	digitálně-analogový převodník		
FPI	Fabry-Perotův interferometr		
LD	laserová dioda (laser diode)		
TEC	termoelektrické chlazení (thermo-electric cooler)		
TOPTEC	Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů v Turnově		
PC	osobní počítač		
P ₁ , P ₂	držáky na optická vlákna		

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá rozborem vlastností proudových zdrojů, měřením zdrojů od renomovaných výrobců a nově vyvíjeného zdroje, a to zejména z hlediska jejich předpokládaného použití s důrazem na dlouhodobou teplotní stabilitu vlnové délky. Podnět pro stavbu nového zdroje přišel ze strany Centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC sídlícím v Turnově na základě nevyhovujících vlastností dostupných průmyslových zdrojů pro laserové diody.

S první koncepcí stavby proudového zdroje již dříve přišel Ing. Jaroslav Novotný z Turnova, který postavil funkční model proudového zdroje pro laserové diody. Podle laborantů výzkumného centra byl ovšem tento zdroj svými parametry nedostatečný jako napájecí zdroj k laserové diodě při použití na interferometrická měření. Z tohoto důvodu se rozhodlo o návrhu nového a lepšího zařízení, které by vyhovovalo lépe svými parametry pro jimi prováděná měření.

Tato práce popisuje svým teoretickým rozborem funkci laserů, laserových diod, proudových zdrojů pro napájení laserových diod a jejich teplotní stabilizaci. Dále obsahuje teoretické znalosti ohledně měření asférických ploch, konstrukce a funkce Peltierova článku, interference a konkrétně Fabry-Perotova interferometru.

Cílem této práce je porovnání dostupných průmyslových zdrojů s proudovou a teplotní regulací k napájení laserových diod a nově vyvíjeného zdroje z pohledu stability výkonu a stability vlnové délky.

Nestabilita vlnové délky vede k nestabilitě interferenčních proužků, které jsou získávány jako měřená data při interferometrických měřeních. Toto je docela běžná vlastnost zejména u lacinějších laserových diod. Cena těchto diod se pohybuje v rozmezí desítky až desetitisíce korun českých. Laserové diody se liší zejména výkonem, jinak ostatní parametry jsou téměř stejné. Mírnější nestabilita nemusí být pro některá měření závažným problémem a stačí, pokud je laserový paprsek stabilní z hlediska vlnové délky pouze po určitou dobu k získání potřebných dat.

Dalšími kritérii k určení nejvhodnějšího zdroje pro laserovou diodu je měření stability interferenčních proužků a stability signálu z Fabry-Perotova interferometru. Měření stability interferenčních proužků vede k nahrávání krátkých videí, z nichž je následně vyhodnocována vlnová délka zdroje optického záření a stabilita interferenční struktury. Měření na Fabry-Perotově interferometru zahrnuje pořízení záznamu z obrazovky osciloskopu při rezonanci kavity s vlnovou délkou paprsku zdroje laserového záření nebo jejími celočíselnými násobky.

1 Teoretický rozbor

Tento teoretický úvod popisuje základní princip funkce laseru, laserové diody, proudového zdroje, teplotní stabilizace laserových diod, měření asférických ploch pomocí laseru, Peltierova článku, interference vlnění a Fabry-Perotova interferometru.

1.1 Lasery, princip činnosti a jejich dělení

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je zařízení, kde dochází k zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je optickým zdrojem, generátorem koherentního monochromatického elektromagnetického záření, které je vyzařováno v úzkém paprskovém svazku. Koherentní záření je takové záření, které má v časovém vývoji stále stejnou frekvenci a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. Monochromatičností záření se rozumí záření o jedné vlnové délce či velice úzkém intervalu vlnových délek. Výhodou laseru je, že může vyzářit velké množství energie na malou plochu i v krátkém čase. Dalšími výhodami resp. vlastnostmi oproti ostatním zdrojům světla jsou koherence záření, monochromatičnost, malá divergence svazku, velká výkonová hustota [15, 24, 37].

Při interakci fotonu s atomem rozlišujeme absorpci a emisi. K interakci fotonu s atomem dochází tehdy, pokud má letící foton energii rovnou rozdílu mezi dvěma energetickými hladinami. Energetické hladiny systému molekul se vytvářejí v důsledku molekulárních vibrací či rotací a následkem potenciální energie elektronů v přítomnosti atomových jader a ostatních elektronů. Energie, kterou foton předá atomu, aby atom mohl přejít na vyšší energetickou hladinu, je dána vzorcem č. 1, kde *h* je Planckova konstanta, v je frekvence fotonu, E_2 je vyšší energetická hladina a E_1 je nižší energetická hladina [24].

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1 \tag{1}$$

Spontánní emise (obr.1) je jev, při kterém se atom nachází na vyšší energetické hladině a dojde-li k uvolnění jeho energie ve formě fotonu, tak atom přechází na nižší energetickou hladinu. Tento přechod na nižší energetickou hladinu nikterak nezávisí na počtu fotonů [24].



Obr. 1: Spontánní emise

Absorpce (obr. 2) je jev, při kterém foton dopadající na atom předá svoji energii atomu a atom přejde na vyšší energetickou hladinu, pokud má energii potřebnou pro přechod. Foton

tedy zanikne. Absorpce je přechod indukovaný fotonem. Na této hladině setrvává atom pouze omezenou dobu a následně se vrací na původní energetickou hladinu. Při zpětném přechodu rozdílovou energii buď vyzáří a nebo předá okolí ve formě tepla. Po absorpci po krátkém okamžiku tedy nastává spontánní emise. Atom při přechodu na nižší energetickou hladinu vyšle foton o stejné energii do okolí náhodným směrem [24].



Obr. 2: Absorpce

Třetí interakcí mezi fotonem a atomem je stimulovaná emise (obr. 3). Stimulovaná (vynucená) emise je jev, při kterém je atom na vyšší energetické hladině a jeho přechod na nižší energetickou hladinu není samovolný, ale je vynucen dalším fotonem. Tento přechod má tedy vliv na fotonové zesílení a tudíž je základem činnosti laserů. Stimulovaná emise je opakem absorpce fotonu [24].



Obr. 3: Stimulovaná emise

Zařízení, které je nazýváno koherentním optickým zesilovačem, zvětšuje amplitudu optického signálu, ale jeho fázi nikterak neovlivňuje. Pokud je optický signál vstupující do koherentního optického zesilovače monochromatický, tak se na výstupu tohoto zařízení objeví zesílený monochromatický signál o stejné frekvenci, ale fáze zůstane stejná a nebo bude posunutá o pevnou hodnotu. Amplituda výstupního optického signálu bude tedy vyšší než amplituda vstupního optického signálu, ale fázi nezachovává. Koherentní záření je zesilováno pomocí stimulované emise. Frekvence atomových, molekulových nebo laserových zesilovačů s pevnou látkou je určena rozdíly mezi energetickými úrovněmi. Běžně v přírodě se vyskytující látky zeslabují světlo, které jimi prochází. Tento jev je způsoben absorpcí velkého počtu atomů na nižší energetické hladině. Absorpce tedy výrazně převyšuje nad stimulovanou emisí, jelikož na vyšší energetické hladině je počet atomů výrazně nižší než počet atomů na nižší energetické hladině. Z tohoto důvodu, aby látka zesilovala koherentní záření, musí být obsazení atomů na vyšší energetické hladině početnější než na nižší energetické hladině. Toto je nazýváno jako

tzv. nerovnovážný stav. K tomuto inverznímu obsazení atomů je potřeba zdroj excitace neboli čerpání atomů na vyšší energetickou hladinu. Čerpání může být prováděno opticky, elektricky nebo chemicky. Zisk neboli zesílení reálného koherentního optického zesilovače je frekvenčně závislé a fázové posunutí rovněž. Zesilovače mohou též dosahovat tzv. saturace, která je projevem nelineárních vlastností zesilovače. Nelineárními vlastnostmi zesilovače je míněno, že při lineárním růstu vstupního napětí přestává růst amplituda výstupního signálu. Saturace vnáší do výstupního signálu harmonické složky. Problém může nastat při zesilování šumu, který se zesílený přenáší do výstupního signálu spolu se zesíleným vstupním signálem. Šum také způsobuje spontánní emise přítomná v optickém zesilovači. Hlavním zdrojem šumu je záření vzniklé spontánní emisí a není závislé na vstupním optickém signálu. Část šumu vzniklého spontánní emisí lze částečně odfiltrovat úzkopásmovým optickým filtrem spolu s polarizačním filtrem, protože spontánní emise je vyzařována do všech směrů. Touto filtrací resp. polarizací je získáván výstupní optický signál, který je vyzařován do prostoru pouze v určitém malém úhlu. Zesílení optického zesilovače je úměrné rozdílu obsazení energetických hladin atomy [24].

Laser je optický oscilátor či rezonátor (obr. 4), který obsahuje rezonanční optický zesilovač záření. Výstupní signál tohoto zařízení je zpětnou vazbou přiváděn zpět na vstup. Tato zpětná vazba musí být ve stejné fázi jako zesilovaný vstupní optický signál. Zesilováním vstupního signálu bude narůstat výstupní signál až do doby, dokud nedojde k saturaci zisku. Tato saturace uvede optický oscilátor do ustáleného stavu. V tomto stavu generuje optický oscilátor při rezonanční frekvenci výstupní optický signál. Ke vzniku oscilací je nutné, aby byl zisk zesilovače větší než ztráty ve zpětné vazbě a změna fáze při jednom oběhu regulační smyčky celočíselným násobkem 2π . Takovýto nestabilní systém začne oscilovat. Vlivem vzrůstajícího výkonu bude docházet k saturaci zesilovače a zisk začne klesat pod svojí původní hodnotu (obr. 4) [24].



Obr. 4: a) Optický rezonátor, b) Závislost zisku a ztrát rezonátoru na výkonu

Soustava oscilátoru se nachází v rovnováze, pokud zisk poklesne na hodnotu ztrát zpětné vazby. Ztráty jsou kompenzovány ziskem, čímž se cyklus opakuje beze změny a na výstupu oscilátoru jsou stacionární oscilace. Obě oscilační podmínky jsou splněné pro jednu či více frekvencí. Tyto frekvence jsou označovány jako rezonanční frekvence oscilátoru. Zpětnou vazbu tvoří aktivní prostředí v optickém rezonátoru. Aktivní prostředí je umístěné mezi 2 zrcadla (obr. 5), mezi nimiž dochází k odrazům fotonů. Výstupní záření prochází skrz jedno ze zrcadel, jež je částečně propustné [24].



Obr. 5: Laserový oscilátor

Lasery lze dělit dle [23]:

a) aktivního prostředí

- 1. plynové lasery
- 2. kapalinové lasery
- 3. pevnolátkové lasery
- 4. polovodičové/diodové lasery
- b) vlnového spektra
 - 1. infračervené
 - 2. viditelné pásmo
 - 3. ultrafialové
 - 4. rentgenové
- c) délky vyzářeného pulzu
 - 1. kontinuální
 - 2. pulzní ns
 - 3. pulzní ps/fs
- d) typu kvantových přechodů
 - 1. molekulární
 - 2. elektronové

- 3. jaderné
- e) typu buzení
 - 1. opticky
 - 2. elektrickým výbojem
 - 3. injekcí nosičů náboje
 - 4. chemicky
 - 5. elektronovým svazkem
 - 6. tepelnými změnami
 - 7. rekombinací

1.2 Laserová dioda

Jedním z typů laserů jsou polovodičové lasery neboli laserové diody (obr. 6). Základem každé polovodičové diody je PN přechod, na kterém se elektrická energie přeměňuje na světelné záření. Aktivním prostředím je zde tedy polovodič. Výstupní záření je monochromatické a koherentní, a je generováno ve formě velmi úzkého svazku s malou rozbíhavostí v úzkém intervalu vlnových délek [13, 14].



Obr. 6: Laserová dioda QFBGLD-775-5 použitá v této diplomové práci [38]

Zdrojem tohoto záření je stojaté vlnění, které vzniká uvnitř dutiny rezonátoru. Princip funkce laserové diody je založen na procesu stimulované emise stejně jako u jakéhokoliv jiného laseru. V polovodičích typu PN jsou atomy velmi blízko vedle sebe. Přechody atomů se nerealizují přechodem na vyšší energetickou hladinu, ale přechodem mezi tzv. energetickými pásy. Jedná se o valenční pás, zakázaný pás a vodivostní pás. V tomto případě dochází k vyzařování spontánního záření s náhodnou fází, které se šíří do všech směrů. Tyto diody využívají tzv. kladné zpětné vazby, kde se část vstupního signálu vrací z výstupu na vstup. Za tímto účelem se používají různé typy rezonátorů. Pokud se stimulované zesílení rovná ztrátám, tak rezonátor přechází do laserového režimu a výstupní optické záření se stává koherentním. Rezonátor s definovanou fází a zesílením zajistí vznik stojatého vlnění. Kvalita rezonátoru určuje stupeň koherence [14].

Dioda přechází z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise při prahovém proudu, tedy z nekoherentního zdroje se stává koherentní zdroj záření. Po dosažení prahového

proudu dochází k prudkému nárůstu výkonu stimulovaného záření, které je koherentní a je lineárně závislé na budícím proudu laserové diody [14].

Oblast použití laserových diod je velmi rozsáhlá. Používají se zejména jako zdroje pro optické vlnovody, v CD mechanikách atd. Cena laserových diod se pohybuje v rozmezí od desítek korun po desetitisíce. Vyrábějí se v mnoha různých typech pouzder [14].

1.3 Proudové zdroje pro laserové diody

Ideálním zdrojem proudu je zdroj, který nemá žádné parazitní vlastnosti a není ovlivnitelný okolními vlivy, nemá žádnou teplotní závislost proudu a žádné kmitočtové závislosti. Vnitřní odpor ideálního zdroje proudu je nekonečný, takže výstupní proud zdroje není závislý na zátěži (obr. 7). Pokud se změní odpor zátěže *R*, změní se tím i hodnota svorkového napětí *U*, ale velikost proudu *I* zůstává stejná [10].



Obr. 7: Ideální zdroj proudu - závislost napětí na proudu

V případě, kdy se změnou odporu zátěže *R* změní hodnota svorkového napětí *U* a málo i hodnota proudu *I*, tak pak se takový zdroj nazývá reálný zdroj proudu (obr. 8).



Obr. 8: Reálný zdroj proudu - závislost napětí na proudu



Obr. 9: Reálný zdroj proudu - náhradní schéma

Skutečný zdroj (obr. 9) proudu má určitou hodnotu zkratového proudu I_K , který se v následujícím uzlu dělí na proud I_i , který teče směrem do zátěže, a proud I (rov. 1), který protéká vnitřním odporem. Zdroj proudu dodává maximální proud I, když je odpor zátěže R_Z řádově menší než vnitřní odpor zdroje R_i .

$$I = I_K - \frac{U}{R_i} \tag{2}$$

Zdroje proudu mají menší oblast použití než zdroje napětí, ovšem je výhodné je používat zejména v oblasti měřicí techniky, převodníků A/D a D/A, operačních a diferenčních zesilovačů. Dnes jsou již velice často používaná integrovaná provedení těchto zdrojů [10].

Výběr proudového zdroje pro laserovou diodu záleží na vybrané diodě a zejména její aplikaci. Někdy lze pořídit velice levný zdroj pro diodu připojitelný na síťové napětí 230 V. Pro jiné aplikace je nutné, aby byl proudový zdroj co nejvíce stabilní, a to už vyžaduje složitější a dražší řízení, resp. napájení diody.

1.4 Peltierův článek

Funkce tohoto článku je založena na Peltierově jevu. Peltierův jev popisuje přímou přeměnu elektrické energie na tepelnou a naopak. Protékáním stejnosměrného proudu místem styku dvou různých vodičů dochází k uvolňování či pohlcování tepla, které je úměrné tomuto proudu. Směr proudu určuje, zda je v daném styku dvou vodičů teplo pohlcováno nebo uvolňováno [20].

Peltierův článek (obr. 10) je složen ze dvou polovodičových sloupků typu P a typu N, které jsou na jedné straně propojeny měděnou spojkou. Přes spodní plošky článku se přivádí elektrická energie. Měděná spojka a měděné kontaktní plošky absorbují nebo vyzařují teplo. Jedna z ploch se ochlazuje a druhá ohřívá [20].



Obr. 10: Peltierův článek

Mezi polovodičem a měděnou spojkou vzniká přechodový odpor, který je nežádoucí. Tento odpor má vliv na rozdíl teplot mezi chladnou a ohřátou plochou. Množství absorbovaného tepla na studené straně a množství vyzářeného tepla na teplé straně Peltierova článku je určeno součinem tzv. Peltierova koeficientu a stejnosměrného proudu procházejícího polovodičem [11].

Tyto články je řetězí do série (běžně 72 článků). Jsou propojeny měděnými spojkami. Takovýmto sériím říkáme Peltierův modul nebo chladící termobaterie (obr. 11) [21].



Obr. 11: Peltierův modul [19]

Každý polovodič modulu je nazýván elementem a v páru s druhým elementem tvoří termočlánek. K dosažení vyššího teplotního rozdílu mezi studenou stranou a teplou stranou se používá kaskádní zapojení, což je nazýváno jako vícestupňové moduly. Peltierův článek nemusí být využíván jen pro přenos tepelné energie při průchodu stejnosměrného elektrického proudu, ale lze jej používat i v opačném smyslu. Může být tedy použit jako zdroj elektrického napětí, přičemž jedna strana musí být ochlazována a druhá ohřívána [21].

1.5 Interference vlnění a interferometr

Pokud se prostorem současně šíří dvě nebo více optických vln, tak je výsledná vlnová funkce dána součtem jednotlivých vlnových funkcí u(r,t), které jsou funkcí polohy r = (x, y, z) a času t. Tento jev je nazýván princip superpozice a vychází z linearity vlnové rovnice (rov. 3) [15].

$$\nabla^2 u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \tag{3}$$

kde ∇^2 je Laplaceův operátor (rov. 4) a *c* je rychlost světla v daném prostředí. Tato rychlost je definována jako podíl rychlosti světla ve vakuu c_0 a indexu lomu *n* [15].

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
(4)

Princip superpozice v případě monochromatických vln o stejné frekvenci platí rovněž pro komplexní amplitudy U(r) (rov. 5) [15].

$$U(r) = A(r)e^{j\varphi(r)}$$
⁽⁵⁾

Výsledkem skládání dvou monochromatických vln s komplexními amplitudami $U_1(r)$ a $U_2(r)$, které mají stejnou frekvenci, bude taktéž monochromatická vlna s komplexní amplitudou U(r) (rov. 6), která bude mít stejnou frekvenci jako optické vlny, z nichž vznikla [15].

$$U(r) = U_1(r) + U_2(r) = A_1(r)e^{j\varphi_1(r)} + A_2(r)e^{j\varphi_2(r)}$$
(6)

Princip superpozice nelze uplatnit pro optické intenzity, protože výsledná intenzita nemusí být součtem intenzit jednotlivých optických vln. Důvodem, proč nelze uplatnit princip superpozice, je právě optická interference. Intenzita jednotlivých monochromatických vln je určena rovnicemi (rov. 7, 8) [15].

$$I_1 = |U_1|^2 \tag{7}$$

$$I_2 = |U_2|^2 \tag{8}$$

Intenzita výsledné vlny je dána rovnicí (rov. 9). Na této rovnici je vidět, že výsledná intenzita nemusí být prostým součtem intenzit jednotlivých monochromatických vln, ale v rovnici se vyskytuje člen, který se vztahuje k interferenci vln. Interferencí světelného záření se rozumí skládání světla, nikoliv ovšem prosté sčítání [15].

$$I = |U|^{2} = |U_{1} + U_{2}|^{2} = |U_{1}|^{2} + |U_{2}|^{2} + U_{1}^{*}U_{2} + U_{1}U_{2}^{*}$$
(9)

Pro získání interferenční rovnice (rov. 12) je nutné dosadit explicitní vyjádření rovnic pro jednotlivé vlny (rov. 10, 11) do rovnice pro výpočet intenzity výsledné vlny (rov. 9) [15].

$$U_1 = \sqrt{I_1} e^{j\varphi_1},\tag{10}$$

$$U_2 = \sqrt{I_2} e^{j\varphi_2},\tag{11}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi,$$
(12)

kde φ fázový rozdíl jednotlivých monochromatických vln. V případě $I_1 = I_2 = I_0$ a $\varphi = 0$ je výsledná intenzita rovna čtyřnásobku intenzit jednotlivých vln $I = 4I_0$. Pro $\varphi = \pi$ se intenzity obou vln navzájem vyruší a výsledná intenzita bude rovna nule. Případ, kdy je výsledná intenzita pouhým součtem intenzit jednotlivých vln, nastává pro $\varphi = \pi/2$ a $\varphi = 3\pi/2$. Pak je výsledná intenzita rovna $I = 2I_0$ [15].

Optický přístroj, který využívá jevu interference optických vln se nazývá interferometr, pomocí kterého lze měřit např. malé vzdálenosti. Tyto přístroje se dělí do tří skupin. Dělí se na interferenční komparátory, interferenční refraktometry a interferenční spektroskopy. Interferenční komparátory jsou přístroje pro měření vzdáleností. Interferenční refraktometry jsou zařízení, podle nichž se určuje relativní změna světelné rychlosti, podle které se dají vypočíst indexy lomu plynů nebo kapalin. Třetími zařízeními jsou interferenční spektroskopy, pomocí kterých lze určit jemné struktury spektrálních čar. Interferometry se používají zejména pro měření s vysokým spektrálním rozlišením [7].

1.5.1 Proužková viditelnost

Proužková viditelnost η (rov. 13) je veličina, která popisuje kontrast interferenčních proužků. Kontrast je ovlivňován vzájemnými intenzitami jednotlivých laserových svazků a jejich polarizacemi. Hodnota proužkové viditelnosti se pohybuje v rozmezí od 0 do 1[9].

$$\eta = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_{MAX} + I_{MIN}} = \frac{2 \cdot E_{01} \cdot E_{02}}{E_{01}^2 + E_{02}^2} \cos \chi$$
(13)

Shodnou intenzitou obou laserových svazků ($E_{01} = E_{02}$) a jejich shodnou polarizací ($\chi = 0^{\circ}$), lze dosáhnout největšího kontrastu interferenčních proužků. Těmito podmínkami bude dosaženo toho, že intenzita tmavých proužků bude rovna nule. Pokud jsou laserové svazky příčně polarizované ($\chi = 90^{\circ}$), tak k interferenci laserových svazků nedochází [9].

1.5.2 Fabry-Perotův Interferometr

Fabry-Perotův interferometr (obr. 12) se skládá z dvojice rovinných planparalelních zrcadel Z_1 a Z_2 neboli zrcadel, kde jsou obě jejich strany přesně rovinné a vzájemně rovnoběžné. Vzdálenost mezi zrcadly je proměnná a jsou odděleny vzduchovou mezerou. Materiálem, ze kterého jsou zrcadla vyrobena, je sklo. Jejich odrazné plochy jsou pokryty vysoce odrazným materiálem, obvykle se jedná o dielektrický film nebo tenkou vrstvu stříbra či hliníku. Kvůli potlačení několikanásobných odrazů je druhá strana vůči odrazné straně nakloněna o určitý úhel. Odrazné plochy zrcadel jsou umístěny naproti sobě. Vzdálenost *d* mezi nimi se pohybuje v řádu mikrometrů až centimetrů [5, 15, 26].



Obr. 12: Schéma Fabry-Perotova interferometru

Existuje také mechanické řešení, kde jsou obě zrcadla kulová a vzdálená od sebe na vzdálenost poloměru zakřivení obou zrcadel. Tento konstrukční režim je nazýván jako degenerovaný neboli konfokální konstrukce optické dutiny mezi zrcadly. Je označována jako degenerovaná, protože frekvence pro určité axiální a příčné režimy optické dutiny jsou stejné neboli degenerované. Kvůli této degeneraci není nutné navést optický svazek zcela přesně do dutiny Fabry-Perotova interferometru. Díky kulovým zrcadlům umožňuje snadnější zarovnání optického paprsku, protože konfokální interferometry jsou poměrně citlivé na úhlové zarovnání. Vnitřní konkávní povrch je vybaven vysoce reflexivní vrstvou a vnější konvexní povrch obsahuje antireflexní povlak. Při pohledu na obr. 13 je možné vidět trajektorii vstupujícího vnějšího laserového paprsku, který vstupuje do kavity ve výšce H od osy této kavity. Paprsek jde po stopě 1, 2, 3 a 4, kde se odráží opět po stopě 1 [26].



Obr. 13: Kavita Fabry-Perotova interferometru [26]

Účelem měření na Fabry-Perotově interferometru je dosažení maximální rezonance v dutině interferometru. Tohoto se dosáhne, pokud je celkové fázové zpoždění násobkem 2π . Celková délka optické dráhy paprsku (rov. 14) je závislá na H, tím pádem se bude stav rezonance lišit dle polohy vstupu paprsku do kavity [26].

$$L = 4R - H^4 / r^3, (14)$$

kde R je zrcadlová odrazivost a r je poloměr zakřivení zrcadel [26].

2 Požadované parametry proudového zdroje PLCS 100

Požadavkem Regionálního Centra speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC bylo navrhnout a vyrobit dva funkční modely nového proudového zdroje.

Mezi požadované vlastnosti nového proudového zdroje patří proudová stabilita $\pm 10 \mu A$ při proudu 100 mA s krokem nastavování 1 μA . Proudový rozsah zdroje byl nárokován na 50 - 100 mA. Dalšími požadavky byla stabilizace teploty s krokem 0,02 °C. Tato teplotní a proudová stabilita měla být dosažitelná nejméně po časový úsek 10 minut. Posledním požadavkem byla komunikace se vzdáleným zařízením pomocí USB nebo Ethernetu.

3 Návrh proudového zdroje s teplotní a proudovou stabilizací PLCS 100

V této kapitole je popsáno schéma a plošný spoj proudového zdroje s proudovou a teplotní stabilizací. Proudový zdroj byl navržen v prostředí Altium Designer.

3.1 Schéma proudového zdroje PLCS 100

Na obr. 14 je znázorněno blokové schéma proudové a teplotní stabilizace proudového zdroje připojeného na laserovou diodu. Toto propojení není přímé, ale laserová dioda je standardně upnuta v patici Arroyo 214, na kterou je připojen proudový zdroj pomocí dvou konektorů LD a TEC. Tato patice je určena přímo pro tento typ diodových pouzder. Přes konektor LD (Laser Diode connector) je do diody přiváděn proud ze zdroje a pomocí konektoru TEC (Thermo-Electric Cooler connector) je připojen termistor a termoelektrické chlazení laserové diody. Hlavním blokem tohoto schématu je procesor, který na základě informací přijatých od PC a z A/D převodníků nastavuje přes D/A převodníky požadované hodnoty elektrického proudu a teploty laserové diody. Informace o teplotě diody je získávána přímo z termistoru zabudovaném přímo v laserové diodě. Pokud má laserová dioda vyšší teplotu než je požadovaná hodnota, tak je dioda ochlazována pomocí interního chlazení přímo v diodě, pokud má dioda nižší teplotu než požadovanou, tak je naopak ohřívána.



Obr. 14: Blokové schéma proudového zdroje PLCS 100 zapojeného k laserové diodě

Podrobné schéma je uvedeno v příloze A nebo na přiloženém DVD-ROM.

3.2 Spínané zdroje

Napájecí spínaný zdroj použitý v této práci je LT8610, jehož schéma je uvedeno na obr. 51 v příloze A. Tento zdroj má vstupní napětí konvertovat na výstupních +5 V. Spínaný zdroj byl navrhnut podle vzorového zapojení uvedeného v dokumentaci [12].

a) Volba spínací frekvence $f_{sw} = 750 \ kHz$:

$$R_{64} = \frac{46,5}{f_{sw}} - 5,2\tag{15}$$

$$R_{64} = \frac{46.5}{0.75} - 5.2 = 56.8 \ k\Omega \tag{16}$$

Zvoleno $R_{64} = 56 k\Omega$

$$f_{sw} = \frac{46,5}{R_{64} + 5,2} \tag{17}$$

$$f_{sw} = \frac{46,5}{56+5,2} = 0,7598 \, MHz \tag{18}$$

b) Výpočet výstupního děliče:

$$U_{OUT} = 0.970 \cdot \left(\frac{R_{39}}{R_{87}} + 1\right) \tag{19}$$

Zvoleno $R_{87} = 243 k\Omega$.

$$R_{39} = R_{87} \cdot \left(\frac{U_{OUT}}{0.97} - 1\right) \tag{20}$$

$$R_{39} = 243000 \cdot \left(\frac{5}{0,97} - 1\right) = 1009577 \,\Omega \tag{21}$$

Přiřazeno z řady výrobních hodnot rezistorů: $R_{39} = 1 M\Omega$.

Skutečné výstupní napětí:

$$U_{OUT} = 0,970 \cdot \left(\frac{R_{39}}{R_2} + 1\right)$$
(22)

$$U_{OUT} = 0,970 \cdot \left(\frac{1000000}{243000} + 1\right) = 4,96 V \tag{23}$$

Ostatní součástky byly použity ze vzorového zapojení uvedeného v dokumentaci LT8610.

3.3 Plošný spoj proudového zdroje PLCS 100

Plošný spoj navrhnutý v prostředí Altium Designer je vidět na obr. 15. Na plošném spoji lze vypozorovat, že napájecí část je oddělena od ostatních obvodů, aby nepřenášelo rušení do zbylé části plošného spoje.



Obr. 15: Plošný spoj proudového zdroje s teplotní stabilizací PLCS 100

3.4 Návrh čelního a zadního panelu proudového zdroje PLCS 100

Čelní a zadní panel byl narýsován v prostředí CorelDRAW X7 dle rozmístění ovládacích prvků a použitých konektorů pro jednotlivá rozhranní. Navržené panely jsou uvedeny v příloze B.

4 Měření vlastností dostupných komerčních zdrojů a nově vyvíjeného zdroje

Pro jednotlivá měření byla jako zdroj laserového záření zvolena laserová dioda QFBGLD-775-5 od firmy Qphotonics. Pouzdro této laserové diody zahrnuje snímací diodu (fotodiodu), která měří vlnovou délku laserové diody, termoelektrické chlazení a NTC termistor k měření aktuální teploty. Jmenovitá hodnota vlnové délky této diody je 775 nm, což je infračervená část spektra světelného záření. Více parametrů této diody při teplotě 25 °C je uvedeno v tabulce tab. 1. Teplota laserové diody, při které byla všechna měření prováděna, byla zvolena 15, 25 a 35 °C. Proudy byly zvoleny 55, 65 a 75 mA. Tyto hodnoty byly voleny po dohodě s konzultantem tak, aby bylo možné získat ucelené informace o vlastnostech laserové diody v dovolených proudových a teplotních intervalech udávaných výrobcem.

Tato laserová dioda byla jednotlivě napájena dostupnými proudovými zdroji a to Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C, ZLD100mA_TEC_v.1, který navrhl a postavil Ing. Jaroslav Novotný, a nově vyrobeným PLCS 100. Jako referenční zdroj laserového záření byl vybrán HeNe laser, jehož typická vlnová délka je 632,8 nm, což je červená část viditelného spektra.

Vlnová délka λ_c	775 +/- 10 nm
Šířka spektra ∆v	1 MHz
Teplotní koeficient vlnové délky dλ/dθ	0,01 nm/°C
Proudový koeficient vlnové délky dλ/dI	0,003 nm/mA
Minimální teplota laserové diody T _{min}	0 °C
Maximální teplota laserové diody T _{max}	60 °C
Prahový proud v propustném směru I _{th}	40 mA
Maximální proud v propustném směru I _{Fmax}	110 mA
Maximální výkon P _{fmax}	10 mW

Tab. 1: Katalogové údaje laserové diody QFBGLD-775-5[38]

4.1 Měření optického výkonu

Blokové schéma pro měření výkonu je znázorněno na obr. 16. Teplota laserové diody QFBGLD-775-5 je regulována zdrojem přes rozhranní TEC na požadovaných 15 °C, 25 °C nebo 35 °C a proud je zase regulován přes rozhranní LD na požadovanou hodnotu. Optický výstup laserové diody byl přiveden přes optické vlákno na tenký fotodiodový výkonový senzor Thorlabs S130C. Informace z tohoto senzoru byla zpracovávána v měřidlu výkonu Thorlabs PM100D, na jehož uživatelském rozhranní byla kvůli správné kalibraci měřidla nastavena jmenovitá hodnota vlnové délky měřeného zdroje optického záření. Toto měřidlo umožňovalo měřit vlnové délky v rozsahu 400 - 1100 nm. Měřidlo výkonu Thorlabs PM100D [34] bylo připojeno k PC, v němž byl instalován software pro zaznamenávání vývoje výkonu v čase.



Obr. 16: Blokové schéma zapojení pro měření optického výkonu

4.1.1 Výsledky měření pro měření optického výkonu



Obr. 17: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 15 °C



Obr. 18: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 25 °C



Obr. 19: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 35 °C



Obr. 20: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 55 mA



Obr. 21: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 65 mA



Obr. 22: Časový vývoj optického výkonu laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 75 mA



Obr. 23: Detail časového vývoje optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 65 mA a teplotě 25 °C

Zdroj	Maximum P [mW]	Minimum P [mW]	Rozdíl P [µW]
HeNe - 25 °C	0,23515	0,23062	4,53
Arroyo 6305 - 55 mA, 15 °C	2,20303	2,09331	109,72
Arroyo 6305 - 55 mA, 25 °C	0,88332	0,80246	80,86
Arroyo 6305 - 55 mA, 35 °C	0,10984	0,08510	24,73
Arroyo 6305 - 65 mA, 15 °C	4,33400	4,25287	81,13
Arroyo 6305 - 65 mA, 25 °C	3,35290	3,27680	76,1
Arroyo 6305 - 65 mA, 35 °C	1,11760	1,07200	45,6
Arroyo 6305 - 75 mA, 15 °C	6,05980	5,77860	281,2
Arroyo 6305 - 75 mA, 25 °C	5,33150	5,30980	21,7
Arroyo 6305 - 75 mA, 35 °C	2,47640	2,45170	24,7
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA,	2,17600	2,16030	15,7
15 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA,	0,84516	0,82627	18,9
25 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA,	0,07245	0,07176	0,69
35 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA,	4,22220	4,15380	68,4
15 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA,	3,40300	3,37610	26,9
25 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA,	0,65082	0,63649	14,33
35 °C	6.4.40.60	6 00000	100 7
Inoriads TED200C + LDC205C - 75 mA,	6,14860	6,00890	139,7
	F 40990	F 22610	92.7
Thomads TED200C + LDC205C - 75 mA,	5,40880	5,32610	82,7
Z5 C Thorlaha TED 200C + LDC 20EC 7E mA	2 55210	2 52270	20.4
11011abs 1ED200C + EDC203C - 73 IIIA,	2,33310	2,32270	50,4
71D100mA TEC v 1 - 55 mA 15 °C	2 15117	1 96693	18/1 2/1
ZLD100mA_TEC_V.1 - 55 mA_25 °C	0.829/17	0 72311	104,24
ZLD100mA_TEC_V.1 - 55 mA_35 °C	0,02547	0,06799	7 37
ZLD100mA TEC v1 - 65 mA 15 °C	4 09107	1 0/339	/7.68
ZLD100mA_TEC_V.1 - 65 mA_25 °C	3 36375	3 15206	211 69
ZLD100mA TEC v 1 - 65 mA 35 °C	1 16540	1 05528	110 12
ZLD100mA TEC v 1 - 75 mA 15 °C	5 96670	5 830/0	136.3
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA 25 °C	5,30070	5,00040	131.36
ZLD100mA_TEC_V.1 - 75 mA_35 °C	2 36087	2 24774	113 13
PLCS 100 - 55 mA 15 °C	0.85284	0 78540	67.44
PLCS 100 - 55 mA 25 °C	0.96498	0 92365	41 33
PLCS 100 - 55 mA 35 °C	0,00400	0.07333	2 78
PLCS 100 - 65 mA 15 °C	1 74290	1 68770	55.2
PLCS 100 - 65 mA 25 °C	1 73/6/	1 69090	<u> </u>
PLCS 100 - 65 mA 35 °C	0.81828	0 7/012	78 / 5
PLCS 100 - 75 mA 15 °C	2 61220	2 5/7/0	65 Q
PLCS 100 - 75 mA 25 °C	2,01320	2,54740	178
PLCS 100 - 75 mA 25 °C	1 52010	1 /0000	120
FLC3 100 - 73 IIIA, 33 C	1,22010	1,40990	120,2

Tab. 2: Optický výkon - minima, maxima a rozdíly výkonu
4.1.2 Vyhodnocení měření optického výkonu

Průběhy optického výkonu byly měřeny 30 s po zapnutí napájení laserové diody, aby došlo k odeznění přechodových dějů a alespoň částečnému ustálení měřených průběhů.

Z časového průběhu optického výkonu při 15 °C (obr.17) je patrné, že pro 65 mA a 75 mA se zdroje Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C a ZLD100mA_TEC_v.1 chovají téměř stejně. Na první pohled může být malý rozdíl v hodnotách optického výkonu dán nepřesnostmi měřidla optického výkonu či ne zcela přesným nastavením napájecího proudu. Při napájecím proudu 75 mA vykazují tyto tři zdroje poměrně velký rozkmit optického výkonu, což může být způsobeno nedostatečnou teplotní stabilizací pro tuto hodnotu proudu, čili špatným nastavením PID regulátoru, který zajišťuje regulaci teploty. Z vypočtených hodnot rozptylů optického výkonu jednotlivých zdrojů (tab. 2) není zřejmé, zda existuje nějaká přímá spojitost mezi napájecím proudem a rozptylem optického výkonu. U proudu 55 mA se při pohledu na graf (obr. 17) může zdát, že zdroj ZLD100mA TEC v.1 je podstatně horší než zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C, ovšem zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 vykazuje rychlejší stabilizaci ale s větším rozkmitem. Zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C naopak mají mnohem menší rozkmit, ale jejich výkon mírně klesá. Z toho plyne, že pro 15 °C a 55 mA se nedá říci, zda jsou průběhy zcela stabilní během měřených 600 sekund. U zdroje PLCS 100 je možné vidět, že pro napájecí proudy 55, 65 a 75 mA nedosahuje stejných výkonů jako ostatní tři proudové zdroje. Tato nerovnost výkonů je způsobena nekvalitní regulací teploty, takže zdroj PLCS 100 se může nacházet na zcela jiném pracovním bodu než zbylé tři zdroje, protože požadovaná a skutečná hodnota teploty laserové diody napájené zdrojem PLCS 100 se může ve skutečnosti hodně lišit. Optický výkon se při 15 °C zvyšuje u všech proudových zdrojů se zvyšováním napájecího proudu laserové diody.

Graf průběhu optického výkonu během měřených 600 s při teplotě 25 °C (obr. 18) říká, že průběhy optického výkonu proudových zdrojů Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C a ZLD100mA_TEC_v.1 jsou téměř totožné. Za povšimnutí stojí, že u zdroje Arroyo 6305 se s vzrůstajícím napájecím proudem při teplotě 25 °C snižuje rozptyl optického výkonu. Naopak u zdroje Thorlabs TED200C + LDC205C to je zcela opačně. Proudový zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 vykazuje poměrně velké rozptyly optického výkonu. Největšího rozptylu dosahuje při napájecím proudu 65 mA. Zdroj PLCS 100 má sice oproti ZLD100mA_TEC_v.1 mnohem menší rozptyl (tab. 2), ale dosahuje při daných napájecích proudech mnohem menšího výkonu, což je určeno nepřesným nastavením pracovního bodu laserové diody. Tento graf zahrnuje také časový průběh optického výkonu HeNe laseru, který byl zvolen jako referenční zdroj optického záření k laserové diodě QFBGLD-775-5. Z grafu lze odečíst, že optický výkon plynného HeNe laseru zdaleka nedosahuje výkonu, který může dodat laserová dioda QFBGLD-775-5 zejména při vyšších napájecích proudech. Ovšem tento plynný HeNe laser dosahuje mnohem nižšího rozptylu optického výkonu než laserová dioda QFBGLD-775-5, tedy i větší stability.

Z naměřených průběhů optického výkonu při 35 °C (obr. 19) lze říci, že zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C mají velice podobný velice podobný časový vývoj optického výkonu. Trochu vyššího výkonu dosahuje zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C oproti Arroyo 6305. Z tab. 2 je zřejmé, že při napájení laserové diody zdrojem Arroyo 6305 či Thorlabs TED200C + LDC205C dochází při teplotě 35 °C k menším výkyvům optického výkonu než při teplotách 15 a 25 °C, ale na druhou stranu je zdroj schopný dodat menší výkon než při nižších teplotách. Proudový zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 se zdrojům Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C svými průběhy optického výkonu velice blíží, ale při proudu 75 mA a teplotě 35 °C je vidět, že během měřených 600 s výkon lehce klesá. Z průběhů optického výkonu laserové diody při použití zdroje PLCS 100 je patrné zejména na průbězích pro 65 a 75 mA, že teplotní stabilizace tohoto proudového zdroje opravdu nevyhovuje, protože dochází ke značným skokům v časovém vývoji optického výkonu. Všechny čtyři zkoumané zdroje při proudu 55 mA a teplotě 35 °C dosahují téhož optického výkonu, ale jedná se pouze o výkon mezi 80 - 100 μW, což je nedostatečný výkon pro interferometrická měření.

Pro úplnost této práce jsou zde uvedeny i grafy pro jednotlivé napájecí proudy v závislosti na změně teploty. Z grafu (obr. 20) je patrné, že čím vyšší je teplota, tím nižších hodnot dosahuje optický výkon laserové diody při napájení jednotlivými zdroji. Za zmínku stojí především zdroj ZLD100mA_TEC_v.1, který dosahuje při 15 °C poměrně velkého rozkmitu optického výkonu oproti ostatním zdrojům. Další zajímavostí je, že laserová dioda při napájení zdrojem PLCS 100 dosahuje vyššího optického výkonu při 25 °C než při 15 °C.

Graf časového vývoje optického výkonu pro proud 65 mA (obr. 21) ukazuje, že proudové zdroje Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C a ZLD100mA_TEC_v.1 mají velice podobný charakter časového vývoje optického výkonu a hodnoty optického výkonu se jen lehce liší. Křivka optického výkonu proudového zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 při 25 °C prvních 150 sekund ukazuje, že proudový zdroj se snaží dosáhnout regulací žádaného výkonu, i tomu odpovídá ze začátku větší rozkmit optického výkonu. Průběhy zdroje PLCS 100 pro 15 a 25 °C překrývají a splývají tedy v jeden. Pro 35 °C dosahuje PLCS 100 nižšího výkonu o zhruba 1 mW.

Z grafu průběhů optického výkonu pro jednotlivé proudové zdroje při 75 mA (obr. 22) lze usoudit, že největšího rozkmitu dosahují zdroje na 15 °C. Zdroj PLCS 100 při 75 mA dosahuje téměř stejné hodnoty optického výkonu na 15 °C i na 25 °C. Při teplotě 35 °C lze zpozorovat v čase 220 sekund poměrně velký skok způsobený nekvalitou teplotní regulace.

Na obr. 23 lze zpozorovat 20 vteřinový detail průběhu optického výkonu laserové diody napájené proudovým zdrojem s teplotní stabilizací Arroyo 6305 při proudu 65 mA a teplotě 25 °C. Toto je náhodně vybraná část křivky popisující časový vývoj optického výkonu laserové diody v krátkém čase. Detailní grafy všech jednotlivých průběhů jsou uvedeny na přiloženém DVD-ROM.

4.2 Měření vlnové délky

Blokové schéma pro měření vlnové délky (obr. 24) je obdobné tomu pro měření výkonu s tím rozdílem, že optický výstup laserové diody je přes antireflexní optické vlákno přiveden na měřidlo vlnové délky WS6-600 High-Precision Wavelength Meter od firmy HighFinesse [8]. Časový průběh vlnové délky je zaznamenáván v PC.



Obr. 24: Blokové schéma zapojení pro měření vlnové délky

Zdroj	Μαχίσιμα λ	Minimum λ	Rozdíl λ
20105	[nm]	[nm]	[nm]
HeNe - 25 °C	632 99174	632 99167	0.07
Arrovo 6305 - 55 mA 15 °C	774 82063	774 81909	1 54
Arroyo 6305 - 55 mA 25 °C	774 77020	774 76919	1 01
Arroyo 6305 - 55 mA 35 °C	-	-	-
Arroyo 6305 - 65 mA 15 °C	774.81788	774,81632	1.56
Arrovo 6305 - 65 mA 25 °C	774.87037	774,86935	1.02
Arrovo 6305 - 65 mA, 35 °C	774,79325	774,79265	0.6
Arrovo 6305 - 75 mA. 15 °C	774.85224	774,85040	1.84
Arrovo 6305 - 75 mA. 25 °C	774.84085	774.84044	0.41
Arrovo 6305 - 75 mA. 35 °C	774.92224	774.92184	0.4
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA. 15 °C	774.87468	774.87397	0.71
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA. 25 °C	774.76418	774.76145	2.73
Thorlabs TED200C + LDC205C - 55 mA. 35 °C	-	-	-
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA, 15 °C	774,93681	774,93646	0,35
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA, 25 °C	774,80210	774,80067	1,43
Thorlabs TED200C + LDC205C - 65 mA, 35 °C	782,03988	782,03143	8,45
Thorlabs TED200C + LDC205C - 75 mA, 15 °C	774,86261	774,86240	0,21
Thorlabs TED200C + LDC205C - 75 mA, 25 °C	774,85106	774,84905	2,01
Thorlabs TED200C + LDC205C - 75 mA, 35 °C	782,22038	782,21042	9,96
ZLD100mA TEC v.1 - 55 mA, 15 °C	774,95717	774,83262	124,55
ZLD100mA TEC v.1 - 55 mA, 25 °C	774,89504	774,75389	141,15
ZLD100mA_TEC_v.1 - 55 mA, 35 °C	-	-	-
 ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA, 15 °C	774,85372	774,85183	1,89

4.2.1 Výsledky měření pro měření vlnové délky

ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA, 25 °C	774,88677	774,88414	2,63
ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA, 35 °C	774,88900	774,88563	3,37
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA, 15 °C	774,97924	774,97710	2,14
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA, 25 °C	774,86908	774,86636	2,73
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA, 35 °C	774,94372	774,94262	1,1
PLCS 100 - 55 mA, 15 °C	775,44191	775,35650	85,41
PLCS 100 - 55 mA, 25 °C	775,43352	775,28966	143,86
PLCS 100 - 55 mA, 35 °C	-	-	-
PLCS 100 - 65 mA, 15 °C	775,11858	765,08608	10033,5
PLCS 100 - 65 mA, 25 °C	775,23217	758,61607	16616,1
PLCS 100 - 65 mA, 35 °C	792,61821	759,13009	33488,12
PLCS 100 - 75 mA, 15 °C	775,49384	775,49224	1,6
PLCS 100 - 75 mA, 25 °C	775,26309	775,26133	1,76
PLCS 100 - 75 mA, 35 °C	775,26425	775,24815	16,1

Tab. 3: Vlnová délka - minima, maxima a rozdíly vlnové délky



Obr. 25: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 15 °C



Obr. 26: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 25 °C



Obr. 27: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 35 °C



Obr. 28: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 55 mA



Obr. 29: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 65 mA



Obr. 30: Časový vývoj vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 75 mA

4.2.2 Vyhodnocení měření vlnové délky

Měření vlnové délky bylo prováděno pomocí měřidla vlnové délky WS6 - 600 High-Precision Wavelength Meter, které měřilo vlnovou délku s přesností desetiny pikometru. Toto měření je nejdůležitější ze všech, protože při interferometrických měřeních je potřeba zejména stability vlnové délky.

Z grafu průběhů vlnové délky laserové diody napájené jednotlivými zdroji při 15 °C (obr. 25) je vidět, že vlnová délka se pro jednotlivé zdroje liší maximálně ve dvou desetinách nanometru. Závislost vlnové délky na napájecím proudu nelze určit z tohoto grafu, protože pro jednotlivé proudy je vlnová délka odlišná. Tuto závislost popisuje graf (obr. 37). Z tabulkových hodnot (tab. 3) lze odečíst, že zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C jsou nejlepší ve stabilizaci vlnové délky laserové diody. Horších parametrů dosahuje Thorlabs TED200C + LDC205C pouze při 65 a 75 mA na teplotě 35 °C, ovšem hodnota vlnové délky je na této teplotě se liší o více než 5 nm. Proudový zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 dosahuje taktéž velmi dobrých parametrů při napájecím proudu 65 a 75 mA, ale při proudu 55 mA už dosahuje poměrně velkého rozkmitu vlnové délky a tím pádem se dá říci, že při tomto proudu není vlnový délka paprsku vystupujícího z laserové diody stabilní. Časový průběh vlnové délky laserové diody při napájení zdrojem PLCS 100 vykazuje velmi velké skoky ve vlnové délce. Vlnová délka je v tomto případě krátkou dobu stabilní, pak následuje krátké pásmo nestabilit a následně další stabilní úsek, ovšem na odlišné vlnové délce. Stabilní je pouze při proudu 75 mA.

Graf (obr. 26) popisuje vývoj vlnové délky v čase při napájení jednotlivými zdroji při teplotě 25 °C. Je zřejmé, že zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C jsou

i při této teplotě velice kvalitní ke stabilizaci vlnové délky laserové diody. Zdroj ZLD100mA_TEC_v.1 je stabilní při napájecím proudu 65 a 75 mA, ovšem při proudu 55 mA dosahuje značné nestability. Při napájení laserové diody proudovým zdrojem PLCS 100 dochází opět k velkým skokům v hodnotách vlnové délky. Tyto skoky jsou dány nevyhovující teplotní regulací.

Na grafu časového průběhu vlnové délky laserové diody při teplotě 35 °C (obr. 27) je vidět, že proudové zdroje Arroyo 6305 a ZLD100mA_TEC_v.1 mají téměř totožné průběhy. Zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C ve spojení s laserovou diodou QFBGLD-775-5 dosahuje větší hodnoty vlnové délky o zhruba 7 nm oproti ostatním zdrojům a při 35 °C má i větší rozkmit, co se týče vlnové délky. U proudového zdroje PLCS 100 dochází k značným přeskokům vlnové délky, ale najdou se i měřené časové úseky, kdy je vlnová délka stabilní. Jedná se o krátký časový úsek například v čase 280 - 360 sekund.

Dalšími grafy jsou průběhy časového vývoje vlnové délky jednotlivých zdrojů při různých napájecích proudech. Prvním grafem je průběh vlnové délky při proudu 55 mA (obr. 28). Na grafu lze pozorovat, že vlnová délka při teplotě 15 °C nabývá vyšších hodnot než při 25 °C. U proudových zdrojů Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C je stabilita vlnové délky opravdu kvalitní oproti zdrojům ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS 100, u kterých vlnová délka dosahuje rozkmitu i přes 100 µW viz. tab. 3.

Graf vývoje vlnové délky v čase pro napájecí proud 65 mA (obr. 29) ukazuje, že vlnová délka laserové diody dosahuje téměř stejné hodnoty pro všechny napájecí zdroje kromě proudového zdroje Thorlabs TED200C + LDC205C při 35 °C, pro který je hodnota vlnové délky vyšší zhruba o 7 nm. Zdroj PLCS 100 vykazuje opět velmi velké zákmity vlnové délky kvůli špatné teplotní regulaci.

Graf časového průběhu vlnové délky pro napájecí proud 75 mA (obr. 30) je téměř identický s grafem pro napájecí proud 65 mA (obr. 29) s jedním zásadním rozdílem. Tím rozdílem je, že proudový zdroj PLCS 100 při proudu 75 mA nevykazuje žádné větší zákmity průběhu vlnové délky, tudíž teplotní regulace u tohoto zdroje pro tento proud je vyhovující.

Průběhy pro proud 55 mA a teplotu 35 °C nebylo možné změřit, protože na detektor měřidla vlnové délky se nedostával potřebný optický výkon. Detailní grafy jednotlivých průběhů jsou uvedeny na přiloženém DVD-ROM.

4.3 Měření na Fabry-Perotově interferometru

Měření na Fabry-Perotově interferometru popisuje schéma uvedené na obr. 31. Laserová dioda je napájena jedním z měřených zdrojů. Paprsek vycházející z laserové diody je pomocí optického vlákna naveden do kolimátoru Thorlabs F810FC-543 [33] pro rozsah vlnových délek 350 - 700 nm, který z různoběžných paprsků udělá paprsky rovnoběžné. Laserový paprsek se tedy šíří v jednom směru a nerozbíhá se do okolí. Tento laserový svazek je naveden pomocí odrazu od zrcátka do Fabry-Perotova interferometru SA210-5B [36] s *FSR* = 10 GHz, jenž má v sobě zahrnutý fotodetektor a je schopen snímat laserový paprsek v rozsahu vlnových délek 535 - 820 nm [25].

Fabry-Perotův interferometr byl propojen s SA201 řízením FPI [35], což je speciálně navrhnutý generátor pro Fabry-Perotův interferometr. Toto řízení FPI generuje vysoce stabilní rampu napětí s amplitudou 11,3 V [25].



Obr. 31: Blokové schéma pro měření na Fabry-Perotově interferometru

4.3.1 Výsledky měření pro měření na Fabry-Perotově interferometru



Obr. 32: Průběh z měření na Fabry-Perotově interferometru pro zdroj PLCS 100 při proudu 65 mA a teplotě 25 °C

Tento signál rampy se používá ke snímání vzdálenosti mezi dvěma zrcadly kavity Fabry-Perotova interferometru. SA201 také obsahuje velice přesný zesilovač signálu z fotodetektoru. K vzniku peaků na druhém signálu, což je zesílený signál z fotodetektoru, dochází pouze v případě, pokud je délka dutiny mezi zrcadly v rezonanci s vlnovou délkou paprsku nebo jejími celočíselnými násobky. Měření bylo prováděno pomocí osciloskopu RIGOL DS4022 [22].

Celková jakost interferometru a záření F_t je definována jako poměr *FSR* (Free Spectral Range) ku FWHM (rov. 24), což je šířka peaku v polovině jeho maxima. Vzdálenost mezi peaky je značena ΔT [25].

$$F_t = \frac{FSR}{FWHM} \tag{24}$$

Kalibrační konstanta c_1 byla vypočtena dle rovnice (rov. 25) a je definována jako podíl FSR ku vzdálenosti mezi peaky ΔT .

$$c_1 = \frac{FSR}{\Delta T} \tag{25}$$

Zdroj	Výška	Šířka v	Jakost	Vzdálenost	Kalibrační	Pohyb
	peaku	půlce	F_t	mezi	konstanta	struktury ∆z
	$H_p [mV]$	peaku	[MHz/ms]	peaky	<i>C</i> ₁	[µs]
		FWHM		∆T [ms]	[MHz/ms]	
		[µs]				
HeNe - 25 °C	26	220	45,5	10,6	943,4	0,4
Arroyo 6305 - 55	-	-	-	-	-	-
mA, 15 °C						
Arroyo 6305 - 55	-	-	-	-	-	-
mA, 25 °C						
Arroyo 6305 - 55	-	-	-	-	-	-
MA, 35 °C	125	224	11 C	12	700.2	0.0
Arroy0 6305 - 65	125	224	44,0	13	769,2	0,8
MA, 15 C	20.0	120	02.2	12.2	751.0	1 1
$m\Delta 25 ^{\circ}C$	50,0	120	د,ده	13,5	731,9	1,1
Arrovo 6305 - 65			_			
mA 35 °C	_		_	_	_	_
Arrovo 6305 - 75	190	310	32.3	13.4	746.3	0.9
mA. 15 °C	100	510	52,5	10,1	, 10,0	0,0
Arroyo 6305 - 75	125	152	65,8	12,5	800	1,6
, mA, 25 °C			,			
Arroyo 6305 - 75	84	232	43,1	13,2	757,6	1,4
mA, 35 °C						
Thorlabs TED200C +	-	-	-	-	-	-
LDC205C - 55 mA,						
15 °C						
Thorlabs TED200C +	-	-	-	-	-	-
LDC205C - 55 mA,						
25 °C						
Thorlabs TED200C +	-	-	-	-	-	-
LDC205C - 55 mA,						
35 °C	4.04	24.6	16.2	12.4		1.2
	181	216	46,3	13,1	763,4	1,2
15 °C						
Thorlahs TED200C +	122	204	10	13.3	751 0	1.6
1DC205C - 65 mA	122	204	75	13,5	751,5	1,0
25 °C						
Thorlabs TED200C +	-	-	-	_	_	-
LDC205C - 65 mA.						
35 °C						
Thorlabs TED200C +	428	196	52	12,8	781,3	1,8
LDC205C - 75 mA,						
15 °C						
Thorlabs TED200C +	324	180	55 <i>,</i> 6	13,2	757,6	1,6
LDC205C - 75 mA,						
25 °C						
Thorlabs TED200C +	66,4	204	49	13	769,2	1,8
LDC205C - 75 mA,						
35 ℃						

ZLD100mA_TEC_v.1	-	-	-	-	-	-
- 55 mA, 15 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	-	-	-	-	-	-
- 55 mA, 25 °C						
ZLD100mA_IEC_v.1	-	-	-	-	-	-
- 55 mA, 35 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	44,8	150	66,7	13,3	751,9	2,6
- 65 mA, 15 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	9,8	560	17,9	12,8	781,3	2,4
- 65 mA, 25 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	-	-	-	-	-	-
- 65 mA, 35 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	121	188	53,2	13,3	751,9	1,8
- 75 mA, 15 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	159	204	49	13,6	735,3	2
- 75 mA, 25 °C						
ZLD100mA_TEC_v.1	24,4	164	61	13,2	757,6	2,2
- 75 mA, 35 °C						
PLCS 100 - 55 mA,	150	320	31,3	13,1	763,4	2,1
15 °C						
PLCS 100 - 55 mA,	-	-	-	-	-	-
25 °C						
PLCS 100 - 55 mA,	-	-	-	-	-	-
35 °C						
PLCS 100 - 65 mA,	532	180	55,6	13,3	751,9	3,6
15 °C						
PLCS 100 - 65 mA,	96	440	22,7	13,2	757,6	4,4
25 °C						
PLCS 100 - 65 mA,	129	154	64,9	13,1	763,4	4,2
35 °C						
PLCS 100 - 75 mA,	564	144	69,4	13	769,2	2,6
15 °C						
PLCS 100 - 75 mA,	208	212	47,2	13,2	757,6	2,5
25 °C						
PLCS 100 - 75 mA,	260	156	64,1	12,8	781,3	2,9
35 °C				-	-	

Tab. 4: Vyhodnocení průběhu z Fabry-Perotova interferometru

4.3.2 Vyhodnocení měření na Fabry-Perotově interferometru

V tab. 4 je možné vidět naměřené hodnoty pomocí kurzoru osciloskopu H_p , FWHM, ΔT a Δz . Z nich byly vypočtené hodnoty F_t a c_1 . Zesílení fotodetektoru bylo nastaveno pro všechna měření na hodnotu 1 milion. Je zřejmé, že se nepodařilo naměřit průběhy pro všechny pracovní body jednotlivých napájecích proudů a teplot, protože u těchto pracovních bodů nedocházelo k rezonanci v dutině Fabry-Perotova interferometru zejména kvůli malému výkonu vstupního signálu.

Parametr šířky peaku v jeho polovině *FWHM* určuje celkovou jakost interferometru a i měřeného optického záření. Čím užší je peak, tím menší je *FWHM* a tím pádem je vyšší jakost F_t . Hodnota jakosti interferometru a optického záření F_t vychází celkem nahodile, to může být dáno i nepřesným odečtením hodnoty *FWHM* z obrazovky osciloskopu pomocí kurzorů.

Vzdálenost mezi peaky ΔT by měla být stejná pro laserovou diodu při napájení různými zdroji, protože tato hodnota souvisí s vlnovou délkou zdroje optického záření. Lišit by se měla pouze hodnota ΔT pro plynný HeNe laser, což se liší, protože hodnota vlnové délky HeNe laseru je jiná než vlnová délka zkoumané laserové diody QFBGLD-775-5. Pro laserovou diodu je hodnota ΔT téměř stejná pro všechny pracovní body.

Při pohledu na hodnoty pohybu Δz jednotlivých průběhů z Fabry-Perotova interferometru lze říci, že nejstabilnější je HeNe laser, u kterého se měřený průběh pohyboval o 0,4 µs na časové ose osciloskopu. Oproti tomu laserová dioda QFBGLD-775-5 vykazovala mnohem větší nestabilitu v rozmezí 0,8 - 4,4 µs. Nejlépe si z napájecích zdrojů laserové diody vedl zdroj Arroyo 6305, naopak nejhorší z pohledu stability pozorovaného průběhu byl proudový zdroj PLCS 100, u něhož takto velká nestabilita mohla být dána zejména nekvalitní teplotní regulací.

U některých zdrojů byly pozorovány na měřeném signálu i další parazitní peaky. Tato vlastnost může být dána zpětnými odrazy, což znamená, že se část výkonu vrací zpět do diody. Jednotlivé grafy jsou uvedeny na přiloženém datovém médiu.

4.4 Měření stability interferenčních proužků



Obr. 33: Blokové schéma zapojení pro měření interferenční struktury

Schéma pro měření interferenčních proužků se nachází na obr. 33. Laserová dioda je napájena jedním ze zkoumaných zdrojů. Výstup laserové diody je připojen na APC optické vlákno, ve kterém se paprsek dělí na dva shodné paprsky o polovině výkonu vstupního paprsku. Výstupy obou vláken jsou upevněny v držácích P₁ a P₂ tak, aby bylo možné zajistit stabilitu daného měřicího ústrojí. Oba optické paprsky dopadají pod zvoleným úhlem $\alpha = 1,146^{\circ}$ na čip kamery UI-3370CP-M-GL s rozlišením 2048 x 2048, kde spolu interferují (obr. 34). Obraz z kamery je zobrazován a vyhodnocován v PC softwarem uEye Cockpit. Vzdálenost paprsků od čipu kamery činní 1600 mm a vzdálenost mezi výstupy optických vláken 32 mm.



Obr. 34: Detailní geometrický popis vzniku interferenční struktury

Vlnové vektory $\overrightarrow{k_1}$ a $\overrightarrow{k_2}$ určují směr šíření jednotlivých paprsků. Vlnový vektor míří ve směru pohybu vlnění. Toto platí pouze pro monochromatické vlnění. Skládáním těchto vln dostaneme interferenční proužky, které leží v rovině vektoru \overrightarrow{K} , jež je kolmá na osu měřicího ústrojí *o*. Vztah mezi vektory $\overrightarrow{k_1}$, $\overrightarrow{k_2}$ a vlnovou délkou λ je dán rovnicí (rov. 26).

$$\left|\vec{k_1}\right| = \left|\vec{k_2}\right| = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{26}$$

$$\vec{K} = \frac{2\pi}{\Lambda} \tag{27}$$

$$\frac{\left|\vec{K}\right|}{\left|\vec{k}_{1}\right|^{2}} = \sin\frac{\alpha}{2} \tag{28}$$

$$\frac{2\pi\lambda}{2\Lambda 2\pi} = \sin\frac{\alpha}{2} \tag{29}$$

Pro malé úhly platí, že sin $\alpha \doteq \alpha$, z čehož vyplývá, že rovnici rov. 29 lze upravit na tvar rov. 30, která popisuje vztah mezi vlnovou délkou λ a periodou interferenční struktury Λ . Změnou vlnové délky se tedy dosáhne změny periody interferenční struktury, přičemž úhel mezi oběma paprsky zůstává stejný.

$$\lambda = \alpha \Lambda \tag{30}$$

Tento matematický výpočet platí pouze pro rovinné vlnoplochy, ale v případě, že se zdroje záření nacházejí daleko od místa, kde se vlny skládají, tak je možné aplikovat tento postup i na kulové vlnoplochy, které se na větší vzdálenosti od zdroje vlnění jeví jako vlnoplochy rovinné.

4.4.1 Výsledky měření pro měření stability interferenčních proužků

Na obr. 35 je vidět obraz snímaný kamerou. Vlivem optické interference dvou dopadajících paprsků do stejného místa na snímací čip kamery vznikají tzv. interferenční proužky. Tuto interferenční strukturu lze měnit nastavením směru laserových paprsků interferenční struktury.



Obr. 35: Ukázka interferenční struktury pro zdroj Thorlabs při napájecím proudu 65 mA a 25 °C

Výsledkem měření stability interferenčních proužků byla krátká videa pořízená kamerou. Během měření nebyl zaznamenáván celý obraz, ale pouze jeho část s rozlišením 368 x 80. Stabilita interferenčních proužků byla detekována jako pohyb interferenční struktury, přičemž nejdříve byla odečtena perioda interferenční struktury, která je dána počtem pixelů určujících vzdálenost mezi dvěma maximy nacházejícími se vedle sebe. Tato perioda byla určena z profilu interferenčních proužků, tedy interferogramu. V ideálním případě by se mělo jednat o sinusový průběh. Další potřebnou hodnotou k určení stability interferenční struktury bylo odečtení počtu pixelů, o kolik se struktura "pohnula". Z těchto dvou známých hodnot byla následně vypočtena vlnová délka.

Zdroj	Perioda Λ [μm]	Vlnová délka λ[nm]	Pohyb struktury Δx [μm]
HeNe - 25 °C	31,6250	632,4051	11
Arroyo 6305 - 60 mA, 15 °C	38,9231	778,3448	11
Arroyo 6305 - 60 mA, 25 °C	38,9231	778,3448	16,5
Arroyo 6305 - 55 mA, 35 °C	-	-	-
Arroyo 6305 - 65 mA, 15 °C	38,9231	778,3448	11
Arroyo 6305 - 65 mA, 25 °C	38,9231	778,3448	16,5
Arroyo 6305 - 65 mA, 35 °C	-	-	-
Arroyo 6305 - 75 mA, 15 °C	38,9231	778,3448	22
Arroyo 6305 - 75 mA, 25 °C	38,9231	778,3448	11
Arroyo 6305 - 75 mA, 35 °C	38,9231	778,3448	27,5
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	16,5
- 55 mA, 15 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	27,5
- 60 mA, 25 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	-	-	_
- 55 mA, 35 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	22
- 65 mA, 15 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	16,5
- 65 mA, 25 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	-	-	-
- 65 mA, 35 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	22
- 75 mA, 15 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	22
- 75 mA, 25 °C			
Thorlabs TED200C + LDC205C	38,9231	778,3448	22
- 75 mA, 35 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 55 mA,	38,9231	778,3448	33
60 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 55 mA,	-	-	-
25 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 55 mA,	-	-	-
35 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA,	38,9231	778,3448	22
15 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA,	38,9231	778,3448	22
25 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 65 mA,	-	-	-
35 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA,	38,9231	778,3448	27,5
15 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA,	38,9231	778,3448	22
25 °C			
ZLD100mA_TEC_v.1 - 75 mA,	38,9231	778,3448	16,5
35 °C			
PLCS 100 - 55 mA, 15 °C	38,5524	770,9320	16,5
PLCS 100 - 55 mA, 25 °C	38,7368	774,6207	22
PLCS 100 - 55 mA, 35 °C	-	-	_

PLCS 100 - 65 mA, 15 °C	38,5524	770,9320	16,5
PLCS 100 - 65 mA, 25 °C	38,7368	774,6207	33
PLCS 100 - 65 mA, 35 °C	38,9231	778,3448	44
PLCS 100 - 75 mA, 15 °C	38,7368	774,6207	33
PLCS 100 - 75 mA, 25 °C	38,9231	778,3448	16,5
PLCS 100 - 75 mA, 35 °C	38,9231	778,3448	16,5

Tab. 5: Výsledky měření stability inteferenční struktury

4.4.2 Vyhodnocení měření interferenčních proužků

Počet proužků pro video s interferenční strukturou pro HeNe laser byl 64 a pro laserovou diodu QFBGLD-775-5 byl počet 52. Perioda interferenční struktury byla určena jako násobek počtu pixelů šířky videa s velikostí jednoho pixelu a to celé dělené počtem proužků interferenční struktury (rov. 30). Velikost jednoho pixelu byla 5,5 µm. Velikost periody Λ byla pro HeNe vypočtena 31,625 µm, což odpovídá 5,75 px, a pro laserovou diodu QFBGLD-775-5 byla 38,9231 µm, což odpovídá 7,08 px na čipu kamery.

Z vypočtených dat (tab. 5) je vidět, že z vypočtené periody interferenční struktury Λ a úhlu α bylo možné relativně přesně určit hodnotu vlnové délky. Vlnová délka pro HeNe laser vychází 632,4051 nm, což je oproti jmenovité hodnotě 632,8 nm relativně malá odchylka. Pro laserovou diodu QFBGLD-775-5 vychází vlnová délka v intervalu 770,9320 - 778,3448 nm. V porovnání s tolerančním pásmem vlnové délky udávané výrobcem (tab. 1) se jedná taktéž o uspokojivý výsledek.

Je nutné brát na vědomí, že tato měření mohla být významně ovlivněna rušením od okolního prostředí, protože tato měřicí aparatura byla velice náchylná na jakýkoliv otřes. Z toho důvodu je nutné brát pohyb interferenční struktury Δx pouze orientačně (tab. 5). Nejlépe z pohledu stability interferenční struktury vychází proudový zdroj Arroyo 6305, pro který Δx nabývá nejmenších hodnot. Pro některé proudy a teploty nebylo možné změřit interferenční strukturu, jelikož oba laserové paprsky nedosahovaly potřebného optického výkonu, aby došlo k interferenčnímu jevu. Kvalitu interferenční struktury lze popsat i tzv. proužkovou viditelností (kap. 1.5.1), kde viditelnost je veličina, která popisuje kontrast mezi interferenčními proužky o vyšších a nižších intenzitách.

Výsledky ovlivnilo také zaokrouhlování výpočtů. K dalšímu zkreslení mohlo dojít nepřesným určením úhlu α , na jehož velikosti je přesnost výsledků velice závislá.

4.5 Měření optického výkonu a vlnové délky v závislosti na změně proudu a teploty



Obr. 36: Závislost vlnové délky na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C



Obr. 37: Závislost vlnové délky na změně teploty laserové diody při 65 mA



Obr. 38: Závislost optického výkonu na změně proudu protékajícího laserovou diodou při 25 °C



Obr. 39: Závislost optického výkonu na změně teploty laserové diody při 65 mA

4.5.1 Vyhodnocení měření závislosti optického výkonu a vlnové délky na změně proudu a teploty

Z grafu závislosti vlnové délky na změně proudu (obr. 36) při teplotě 25 °C je vidět, že hodnota vlnové délky mírně vzrůstá s navyšující se hodnotou proudu protékajícího laserovou diodou. U napájecího zdroje Thorlabs TED200C + LDC205C je lze spatřit náhlou změnu vlnové délky, která je dána přepnutím laserové diody do jiného módu. Tento skok je ve skutečnosti mnohem strmější, ovšem díky zvolenému kroku měření vypadá grafické vyjádření jako pozvolnější změna vlnové délky. Dále si lze všimnout, že zdroje Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C mají téměř identický vývoj vlnové délky v závislosti na zvyšujícím se proudu. Naproti tomu PLCS 100 a ZLD100mA_TEC_v.1 vykazují vyšší hodnoty vlnové délky, ale tendence jejího růstu je stejná jako u Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C.

Závislost vlnové délky na změně teploty při proudu 65 mA (obr. 37) vypadá na první pohled poměrně chaoticky, ovšem náhlé změny jsou způsobené změnou módu laserové diody. Stejně jako u předešlého grafu jsou tyto změny mnohem strmější. Porovnáním s předešlým grafem lze říci, že závislost vlnové délky na změně teploty je mnohem významnější než na změně proudu. Je nutné dobře zvolit pracovní bod laserové diody, protože pokud se pracovní bod nachází na hranici přechodu do jiného módu, tak dochází k výrazným nestabilitám a vlnová délka se mění v desetinách nanometrů, což už je poměrně značná nestabilita. Průběh vlnové délky 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C je podobného charakteru, ale ke změnám ve vlnové délce dochází na zcela jiných teplotách. U zdrojů PLCS 100 a ZLD100mA_TEC_v.1 dochází na teplotách pod 20 °C pouze k nárůstu hodnoty vlnové délky a dále jsou svým charakterem podobné zdrojům Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C, ovšem četnost skoků v hodnotách vlnové délky je u zdroje PLCS 100 mnohem vyšší a u zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 mnohem nižší. Tyto skoky mohou být dány jednak přechody do vyššího módu a pak následným vrácením se do předešlého a nebo do jiného. Důvodem dále mohou být zpětné odrazy, když se vrací část výkonu zpět či efekt samotné laserové diody.

Graf závislosti optického výkonu laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C (obr. 38) určuje, že zvýšením napájecího proudu se dosáhne vyššího optického výkonu na výstupu diody. Za povšimnutí stojí zejména větší optický výkon zdroje ZLD100mA_TEC_v.1, což může být dáno nepřesným nastavením teploty. Teplota mohla být ve skutečnosti o něco nižší. Naopak zvyšováním teploty při proudu 65 mA se docílí snížení optického výkonu (obr. 39). Proudový zdroj PLCS 100 vykazuje velmi zvláštní průběh optického výkonu při zvyšování teploty. Tento jev je dán nekvalitou teplotní regulace. Tabulky k těmto měřením jsou uvedeny v příloze C.

5 Návod k obsluze PLCS 100

Nově navrhnutý zdroj PLCS 100 je ovládán z PC textovými příkazy přes terminál. Tento návod obsahuje i zapojení konektorů LD a TEC.

5.1 Ovládání zdroje PLCS 100

Změnu hodnoty proudu protékajícího diodou či teploty diody lze nastavit změnou hexadecimální hodnoty registru procesoru a tím změnu hodnoty na D/A převodníku. Ovládání 24-bitových D/A převodníků lze provádět pomocí terminálu nainstalovaném v PC (např. Hercules) zadáním předem definovaných příkazů ve tvaru:

DAWR mezera I nebo T mezera číslo registru mezera hodnota 24 bit

příklad:

DAWR I 0 800000

DAWR T 0 800000

I [mA]	55	56	57	58	59	60	61	62
Hexadecimální hodnota registru	383500	394000	3A4000	3B4900	3C5000	3D5300	3E5555	3F6000

I [mA]	63	64	65	66	67	68	69	70
Hexadecimální hodnota registru	406500	416700	427000	437500	447A00	457FFF	468600	478DDD

I [mA]	71	72	73	74	75
Hexadecimální hodnota registru	489000	416700	4A9D00	4BA000	4CA500

Tab. 6: Hexadecimální parametr příkazu - proud

ϑ [°C]	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5
Hexadecimální hodnota registru	47BC68	46F4F5	462DA9	456695	499FC8	43D950	43133E	424D9E

ϑ [°C]	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5
Hexadecimální Hodnota registru	418880	40C3F1	400000	3F3CB9	3E7A2B	3DB961	3CF76A	3C3751

ϑ [°C]	23	23,5	24	24,5	25	25,5	26	26,5
Hexadecimální hodnota registru	3B7821	3AB9E8	39FCAF	394083	38856E	37CB79	3712AF	365B1A

ϑ [°C]	27	27,5	28	28,5	29	29,5	30	30,5
Hexadecimální hodnota registru	35A4C3	34EFB2	343BF0	338985	32D879	3228D2	317A99	30CDD3

ϑ [°C]	31	31,5	32	32,5	33	33,5	34	34,5
Hexadecimální hodnota registru	302287	2F78BB	2ED074	2E29B7	2D848A	2CE0F0	2C3EEE	2B9E87

ϑ [°C]	35
Hexadecimální hodnota registru	2AFFBF

Tab. 7: Hexadecimální parametr příkazu - teplota

5.2 Zapojení výstupních konektorů PLCS 100

	CURRENT
Pin	Popis funkce pinu
1	-
2	-
3	-
4	katoda laserové diody
5	katoda laserové diody
6	katoda fotodiody
7	anoda fotodiody
8	anoda laserové diody
9	anoda laserové diody

Zapojení konektoru pro regulaci proudu LD je uvedeno v tab. 8.

Tab. 8: Popis pinů konektoru LD

Zapojení konektoru k regulaci teploty TEC je znázorněno v tab. 9. Tento konektor není k patici laserové diody připojen pouze jedním kabelem, ale termistor pro odměřování aktuální teploty laserové diody musí být připojen přes samostatný stíněný kabel.

TEMPERATURE				
Pin	Popis funkce pinu			
1	TEC+			
2	TEC+			
3	TEC-			
4	TEC-			
5	TEC-			
6	-			
7	Termistor			
8	Termistor			
9	-			

Tab. 9: Popis pinů konektoru TEC

Závěr

Účelem této práce bylo podílení se na návrhu napájecí části pro nový zdroj PLCS 100, jeho osazení a následné oživení plošného spoje do provozuschopného stavu. Nejpodstatnější částí této práce bylo ovšem měření vlastností proudových zdrojů Arroyo 6305, Thorlabs TED200C + LDC205C, ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS 100 k napájení laserové diody QFBGLD-775-5 a určení vlastností plynného HeNe laseru. Pro všechna měření byly zvoleny teploty 15, 25 a 35 °C a budící proudy 55, 65 a 75 mA, při kterých byla prováděna jednotlivá měření tak, aby bylo možné popsat chování laserové diody v určitém intervalu proudu a teploty. U některých měření nebylo možné změřit hodnotu požadované veličiny, protože výkon laserové diody při napájení určitými zdroji nebyl dostatečný k detekování požadovaného signálu.

Prvním měřením bylo určení stability optického výkonu po dobu nejméně 10 minut u HeNe laseru a laserové diody QFBGLD-775-5 napájené jednotlivými zdroji. Z naměřených výsledků je zřejmé, že největší stability dosahuje plynný HeNe laser, který dosahuje rozkmitu optického výkonu pouze 4,53 μW. Oproti tomu laserová dioda dosahuje mnohem větší nestálosti optického výkonu. Nejlepším ze zkoumaných napájecích zdrojů se z pohledu měření optického výkonu projevil zdroj Arroyo 6305 a zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C. Pro tyto zdroje se rozkmit výkonu pohyboval v rozmezí 0,69 - 139,7 μW. Naopak nejhorším byl nový PLCS 100, u kterého docházelo k nahodilým skokům optického výkonu.

Druhé měření zahrnovalo měření stability vlnové délky také po dobu 10 minut pro stejné komponenty. Toto měření je nejpodstatnější ze všech, protože stabilita vlnové délky je důležitá při interferometrických měřeních. Nestabilitou může dojít k pohybům interferenční struktury. Z měření je zřejmé, že nejlepší stabilitu vlnové délky vykazuje plynný HeNe laser, který dosahuje rozkmitu pouze 0,07 pikometru. Podstatně hůře oproti HeNe laseru si vedla laserová dioda QFBGLD-775-5. Nejlepším zdrojem z hlediska stability vlnové délky pro laserovou diodu se jeví proudový zdroj Arroyo 6305, u kterého se stabilita pohybovala v rozmezí 0,4 - 1,84 pikometru. Zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C dosahoval při některých proudech a teplotách také velice dobré stálosti vlnové délky laserové diody s rozkmitem 0,21 - 9,96. Proudové zdroje ZLD100mA TEC v.1 a PLCS 100 vykazují poměrně velké nestability, protože u těchto zdrojů není tak kvalitní teplotní regulace jako u Arroyo 6305 a Thorlabs TED200C + LDC205C. U zdroje PLCS 100 dochází k velkým skokům v hodnotách vlnové délky právě kvůli špatné teplotní regulaci. Tento jev je dán zejména nevhodně zvoleným návrhem plošného spoje PLCS 100, u kterého se na vstupy převodníků dostávají parazitní signály a převodník pak generuje na svém výstupu jinou hodnotu, než kterou by generovat měl. Důsledkem jsou tedy skoky v časovém průběhu vlnové délky laserové diody, protože stabilita vlnové délky je závislá zejména na teplotě. Lepších vlastností proudového zdroje s teplotní regulací PLCS 100 by mohlo být docíleno zejména galvanickým oddělením jednotlivých částí plošného spoje pomocí optoelektronických členů tak, aby se na některé součástky nepřenášel parazitní signál od jiných částí.

Třetím měřením bylo sledování stability průběhu z Fabry-Perotova interferometru. Jednalo se o zesílený signál z fotodetektoru umístěného v interferometru, který vznikal na základě rezonance, ke které docházelo v případě, pokud se délka kavity shodovala s vlnovou délkou laserové diody nebo jejími celočíselnými násobky. Z tohoto měřeného průběhu byla pomocí kurzorů osciloskopu odečítána nestálost tohoto signálu, jelikož docházelo k jeho pohybu na časové ose osciloskopu. Lépe než laserová dioda si vedl plynný HeNe laser, u kterého docházelo k posuvu o 0,4 µs. Stabilita tohoto laseru by měla dosahovat lepších hodnot, ale tento plynný laser již díky svému stáří nedosahuje tak kvalitních vlastností. Nejlepší stability dosahuje laserová dioda QFBGLD-775-5 ve spojení s napájecím zdrojem Arroyo 6305. Neméně horší je zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C. Zdroje ZLD100mA_TEC_v.1 a PLCS 100 vykazují celkem velkou nestabilitu měřeného průběhu. Součástí tohoto měření bylo i určení jakosti interferometru a laserového záření, ovšem tyto hodnoty nelze brát zcela věrohodně, protože mohou být zkreslené nepřesným odečten z obrazovky osciloskopu. Dále mohou být ovlivněny i zpětnými odrazy. To znamená, že se část výkonu vrací zpět.

Čtvrtým měřením bylo určení stability interferenčních proužků. Stabilita byla vyhodnocována z krátkých videí vybrané části obrazu získaného z kamery. Tato videa byla analyzována v softwaru Matlab, ve kterém byly vykreslovány interferogramy pro jednotlivé zdroje optického záření. Z těchto interferogramů byla odečítána perioda a z ní následně vypočítána vlnová délka. Dále byla určována stabilita interferenčních proužků pomocí odečtu z vícero interferogramů vykreslovaných v různých časech zkoumaného videa. Toto měření je spíše orientační, protože výsledky z něj jsou celkem nepřesné. Nejlepší stability dosahuje HeNe laser a laserová dioda QFBGLD-775-5 napájená zdrojem Arroyo 6305. Z vypočtených hodnot vlnové délky je vidět, že se tato metoda až o tolik procent nemýlí, ale je velice závislá na přesnosti výpočtu úhlu mezi dvěma zdroji optického záření. Pro HeNe laser vychází vlnová délka 632,4051 nm oproti jmenovitým 632,8 nm a pro laserovou diodu QFBGLD-775-5 v rozmezí 770,9320 nm až 778,3448 nm oproti jmenovité hodnotě 775 nm.

Z výsledků těchto všech provedených měření je zřejmé, že plynný HeNe laser je stabilnější než laserová dioda QFBGLD-775-5. Nejvhodnějším proudovým zdrojem s teplotní regulací je Arroyo 6305 od výrobce Arroyo Instruments. Tento zdroj je tedy z pohledu své stability vlnové délky a výkonu nejvhodnějším zdrojem pro laserové diody, které lze použít například k měření povrchu asférických čoček.

62

Z doporučené literatury jsem nepoužil literaturu Mikroprocesory a mikropočítače od J. Pinkera, protože jsem se vytvářením softwaru pro procesor nezabýval. Software pro proudový zdroj PLCS 100 napsal Ing. Jaroslav Buchta. Tento software není uložen na přiloženém datovém médiu. Plošný spoj navrhl vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D. Podrobnější náměry, grafy a M-files, které byly použity v této práci, jsou uloženy na přiloženém DVD-ROM.

Literatura

- [1] Analog Devices. ADM2687EBRIZ-RL7 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM2682E_2687E.pdf.
- [2] Analog Devices. ADR3425ARJZ-R7 [Online]. 2010 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/ADR3412_ADR3420_ADR3425_ADR3430_ADR3433_ADR3440_A DR3450.pdf.
- [3] Analog Devices. AD8628ARTZ-R2 [Online]. 2014 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported- http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/AD8628_8629_8630.pdf.
- [4] Atmel Corporation. AT24C16C-SSHM-T [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.atmel.com/images/atmel-8719-seeprom-at24c16c-datasheet.pdf.
- [5] Fabry–Pérot interferometer. 2015. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry%E2%80%93P%C3%A9rot_interferometer.
- [6] Fairchild Semiconductor. KA7805AE [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: https://www.fairchildsemi.com/datasheets/KA/KA7805AE.pdf.
- [7] Fuka J., Havelka B.: Optika a atomová fyzika, I. Optika, fyzikální kompendium pro vysoké školy, díl IV., SPN, Praha 1961.
- [8] HighFinesse. WS6-600 High-Precision Wavelength Meter [Online]. 2013
 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: http://www.toptica.com/uploads/media/HighFinesse_Product_Brochure_2013.pdf.
- Kopecký, V.: Laserová anemometrie v mechanice tekutin, TRIBUN EU, Brno, 2008, ISBN 978-80-7399-357-3.
- [10] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Zdroje proudu*. 1. vyd. Praha: BEN technická literatura, 1999, 111 s. ISBN 80-860-5684-8.
- [11] KUBINA, Pavel. Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. FFC Public [online]. 2013 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: <u>http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765</u>.
- [12] Linear Technology. LT8610EMSE#PBF [Online]. 2012 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/8610fa.pdf.
- [13] LUKÁŠ, Michal. 2001. Část 1 Princip funkce laserových diod. Laserové diody [online]. (1) [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html.

- [14] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VI*. 1. vyd. České Budějovice: Koop, 2001, 287 s. ISBN 80-723-2146-3.
- [15] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2008, 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [16] Maxim Integrated. MAX1978 [Online]. 2010 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1978-MAX1979.pdf.
- [17] Microchip Technology Inc. MCP6562-E/MS [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29].
 Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22139C.pdf.
- [18] Microchip Technology Inc. LAN8742A-CZ [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/8742a.pdf.
- [19] Peltier element. *Creativity is contagious. Pass it on*. [online]. 2011 [cit. 2014-12-02].
 Dostupné z: <u>http://www.mathf.comlu.com/?page=pr_peltier&lang=en</u>.
- [20] Peltierův článek. Pokusy z fyziky [online]. 2012 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: http://pokusy.upol.cz/skolni-pokusy/elektrina-a-magnetismus/peltieruvclanek/peltieruv-clanek-41/.
- [21] Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2010 [cit. 2014-12-02]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev.
- [22] RIGOL TECHNOLOGIES, Inc.. SA210-5B [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: http://www.batronix.com/pdf/Rigol/Datasheet/DS4000_DataSheet_EN.pdf.
- [23] Rozdělení laserů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2014 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <u>http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru</u>.
- [24] SALEH, Bahaa E. *Základy fotoniky: fundamentals of photonics*. 1. vyd. Překlad Miloslav Dušek. Praha: Matfyzpress, 1995, xxii, 778 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [25] Scanning Fabry-Perot Interferometers. *Thorlabs* [online]. 2015 [cit. 2015-05-15].
 Dostupné z: https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=859.
- [26] Scanning Fabry-Perot Interferometers. *Thorlabs* [online]. 1999 [cit. 2015-5-15].
 Dostupné z: <u>http://www.thorlabs.de/tutorials.cfm?tabID=21118</u>.
- [27] STMicroelectronics. STM32F407VGT6 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf.
- [28] Thorlabs. LM14S2 [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.thorlabs.us/thorcat/10600/LM14S2-Manual.pdf.

- [29] Texas Instruments. ADS1271IPWG4 [Online]. 2007 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1271.pdf.
- [30] Texas Instruments. DAC1220E/2K5 [Online]. 2009 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac1220.pdf.
- [31] Texas Instruments. LM1085IT-5.0 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1085.pdf.
- [32] Texas Instruments. LP38691DT-3.3 [Online]. 2013 [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lp38691.pdf.
- [33] THORLABS. F810FC-543 [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/thorcat/13600/F810FC-543-AutoCADPDF.pdf.
- [34] THORLABS. PM100D [Online]. 2011 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: http://www.thorlabs.de/thorcat/17600/PM100D-Manual.pdf.
- [35] THORLABS. SA201 [Online]. 2013 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/thorcat/6600/SA201-Manual.pdf.
- [36] THORLABS. SA210-5B [Online]. 2012 [cit. 2015-5-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.de/thorcat/19500/SA210-5B-Manual.pdf.
- [37] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika oborová encyklopedie*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994, 474 s. ISBN 80-858-4956-9.
- [38] Wavelength stabilized single mode fiber coupled laser diode 5mW @ 775nm, QFBGLD-775-5. 2000. *QPHOTONICS* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http:// http://www.qphotonics.com/Wavelength-stabilized-single-mode-fiber-coupled-laserdiode-5mW-775nm.html.

Příloha A - schéma zdroje



Obr. 40: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 1



Obr. 41: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 2



Obr. 42: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 3



Obr. 43: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 4



Obr. 44: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 5



Obr. 45: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 6



Obr. 46: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 7



Obr. 47: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 8



Obr. 48: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 9



Obr. 49: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 10



Obr. 50: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 11


Obr. 51: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 12



Obr. 52: Schéma proudového zdroje PLCS 100 - část 13

Příloha B - ovládací panely



Obr. 53: Čelní panel proudového zdroje PLCS 100



Obr. 54: Zadní panel proudového zdroje PLCS 100

Příloha C - tabulky

I [mA]	λ [nm]	P [mW]
55	774,6174	0,3618
56	774,6185	0,5712
57	774,6196	0,7496
58	774,6335	0,8523
59	774,6347	1,155
60	774,6358	1,341
61	774,6488	1,456
62	774,6506	1,713
63	774,6519	1,932
64	774,6648	2,055
65	774,6667	2,147
66	774,6676	2,492
67	774,6812	2,633
68	774,6825	2,713
69	774,6837	3,054
70	774,6973	3,208
71	774,6981	3,311
72	774,7001	3,609
73	774,7133	3,756
74	774,7146	3,851
75	774,7162	4,162

Tab. 10: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj Arroyo 6305

ϑ [°C]	λ [nm]	P [mW]
15	774,6669	4,012
15,5	774,6874	3,929
16	774,7200	3,881
16,5	774,7515	3,820
17	774,6456	3,784
17,5	774,6774	3,629
18	774,7071	3,586
18,5	774,7267	3,351
19	774,7580	3,338
19,5	774,6521	3,283
20	774,6814	3,140
20,5	774,7009	2,928
21	774,7307	2,845
21,5	774,7501	2,719
22	774,6437	2,678
22,5	774,6744	2,558
23	774,6922	2,504
23,5	774,7235	2,429
24	774,6174	2,391
24,5	774,6485	2,328

25	774,6683	2,305
25,5	774,7006	2,192
26	774,7325	2,174
26,5	774,6279	2,166
27	774,6573	2,103
27,5	774,6902	2,092
28	774,7206	1,964
28,5	774,6171	1,873
29	774,6473	1,849
29,5	774,6776	1,805
30	774,6981	1,786
30,5	774,7304	1,721
31	774,6370	1,576
31,5	774,6562	1,533
32	774,6869	1,385
32,5	774,7057	1,301
33	774,7376	1,218
33,5	774,6315	1,053
34	774,6623	0,9347
34,5	774,6804	0,7901
35	774,7119	0,6349

Tab. 11: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 65 mA - zdroj Arroyo 6305

I [mA]	λ [nm]	P [mW]
55	774,6246	0,4508
56	774,6260	0,6134
57	774,6369	0,7331
58	774,6409	1,037
59	774,6424	1,217
60	774,6557	1,312
61	774,6574	1,599
62	774,6585	1,798
63	774,6588	1,918
64	774,6734	2,032
65	774,6751	2,358
66	774,5521	2,495
67	774,5659	2,561
68	774,5674	2,929
69	774,5686	3,062
70	774,5702	3,158
71	774,5836	3,488
72	774,5847	3,618
73	774,5977	3,702
74	774,5985	4,043
75	774,6007	4,156

Tab. 12: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C

ϑ [°C]	λ [nm]	P [mW]
15	774,6004	4,216
15,5	774,6327	4,139
16	774,6635	4,089
16,5	774,6985	4,035
17	774,7294	3,972
17,5	774,6384	3,872
18	774,6588	3,716
18,5	774,6913	3,604
19	774,7238	3,529
19,5	774,6181	3,449
20	774,6493	3,274
20,5	774,6807	3,138
21	774,7117	3,070
21,5	774,6077	2,801
22	774,6380	2,722
22,5	774,6570	2,614
23	774,6883	2,557
23,5	774,7205	2,481
24	774,6167	2,346
24,5	774,6484	2,321
25	774,6798	2,307
25,5	774,7127	2,275
26	774,6097	2,247
26,5	774,6410	2,238
27	774,6737	2,174
27,5	774,7062	2,115
28	774,6155	2,059
28,5	774,6473	1,878
29	774,6793	1,761
29,5	774,7120	1,702
30	774,6081	1,665
30,5	774,6397	1,589
31	774,6719	1,471
31,5	774,7039	1,246
32	774,7360	1,194
32,5	774,6312	1,112
33	774,6626	0,9586
33,5	774,6934	0,7941
34	774,7136	0,6647
34,5	774,7456	0,5231
35	-	0,4168

Tab. 13: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 65 mA - zdroj Thorlabs TED200C + LDC205C

I [mA]	λ [nm]	P [mW]
55	774,8601	0,8196
56	774,8613	1,058
57	774,8621	1,378
58	774,8634	1,647

59	774,8642	1,963
60	774,8649	2,271
61	774,8657	2,531
62	774,8663	2,864
63	774,8671	3,081
64	774,8678	3,191
65	774,8684	3,329
66	774,8692	3,934
67	774,8699	4,027
68	774,8706	4,052
69	774,8711	4,118
70	774,8719	4,205
71	774,8725	4,482
72	774,8733	4,686
73	774,8739	4,927
74	774,8747	5,162
75	774,8756	5,308

Tab. 14: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj ZLD100mA_TEC_v.1

ϑ [°C]	λ [nm]	P [mW]
15	774,8534	4,081
15,5	774,8748	4,005
16	774,8920	3,958
16,5	774,9107	3,898
17	774,9281	3,835
17,5	774,9476	3,792
18	774,9683	3,724
18,5	774,9803	3,678
19	774,9924	3,639
19,5	775,0196	3,608
20	775,0385	3,572
20,5	774,9771	3,541
21	774,9904	3,512
21,5	775,0118	3,496
22	775,0286	3,488
22,5	775,0423	3,425
23	775,0574	3,391
23,5	775,0684	3,320
24	775,0821	3,284
24,5	774,9435	3,247
25	774,9604	3,204
25,5	774,9758	3,019
26	774,9856	2,845
26,5	774,9942	2,648
27	775,0049	2,481
27,5	775,0121	2,351
28	775,0243	2,236
28,5	775,0327	2,107
29	775,0408	1,998

29,5	774,9588	1,924
30	774,9703	1,853
30,5	774,9822	1,806
31	774,9906	1,749
31,5	775,0042	1,687
32	775,0120	1,603
32,5	775,0217	1,556
33	774,9465	1,425
33,5	774,9518	1,367
34	774,9641	1,289
34,5	774,9708	1,203
35	774,9857	1,129

Tab. 15: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 65 mA - zdroj ZLD100mA_TEC_v.1

I [mA]	λ [nm]	P [mW]
55	775,0481	1,872
56	775,0591	1,911
57	775,0624	1,954
58	775,0644	2,005
59	775,0652	2,043
60	775,0659	2,106
61	775,0791	2,187
62	775,0812	2,234
63	775,0825	2,291
64	775,0932	2,371
65	775,0967	2,407
66	775,0984	2,456
67	775,1003	2,498
68	775,1086	2,542
69	775,1148	2,632
70	775,1159	2,674
71	775,1167	2,753
72	775,1291	2,796
73	775,1316	2,814
74	775,1335	2,963
75	775,1464	3,051

Tab. 16: Závislost vlnové délky laserové diody na změně proudu při teplotě 25 °C - zdroj PLCS 100

ϑ[°C]	λ [nm]	P [mW]
15	775,0236	2,544
15,5	775,0478	2,552
16	775,0657	2,587
16,5	775,1015	2,573
17	775,1366	2,581
17,5	775,1549	2,604
18	775,1719	2,563
18,5	775,1856	2,548
19	775,1897	2,583
19,5	775,1903	2,567

20	775,2065	2,542
20,5	775,2234	2,590
21	775,1765	2,479
21,5	775,2263	2,354
22	775,1624	2,218
22,5	775,1964	2,103
23	775,1237	1,857
23,5	775,1695	1,768
24	775,1246	1,613
24,5	775,0487	1,726
25	775,1121	1,734
25,5	775,0523	1,927
26	775,1006	1,851
26,5	775,1492	1,879
27	775,0763	1,778
27,5	775,1226	1,714
28	775,0328	1,688
28,5	775,0809	1,602
29	775,1285	1,482
29,5	775,1603	1,414
30	775,0724	1,289
30,5	775,1062	1,174
31	775,1398	1,071
31,5	775,0507	0,9624
32	775,1129	0,8567
32,5	775,1485	0,8032
33	775,0736	0,7671
33,5	775,1219	0,9647
34	775,1564	0,8921
34,5	775,0657	0,8369
35	775,1132	0,8207

Tab. 17: Závislost vlnové délky laserové diody na změně teploty při proudu 65 mA - zdroj PLCS 100