



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VLIV PWM ŘÍZENÍ LASEROVÉ DIODY NA JEJÍ CHARAKTERISTIKY

EFFECT OF PWM CONTROL OF A LASER DIODE ON ITS CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Foltá

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Šťáva, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Lukáš Folta

ID: 227244

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Vliv PWM řízení laserové diody na její charakteristiky

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte rešerši a studium literatury zabývající se principy fungování polovodičových laserů a jejich řízením. Navrhněte a realizujte obvod pro PWM (pulse-width-modulation) řízení, navrhněte experimenty pro určení vlivu PWM řízení na parametry laserové diody a popište principy detekce sledovaných parametrů. Provedte experimentální měření vybraných charakteristik při CW (continuous-wave) a PWM režimu řízení. Analyzujte získaná data a interpretujte výsledky měření. Zhodnoťte využitelnost zjištěných výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SANDS, D. Diode Lasers. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics, 2005. ISBN 0-7503-0726-9
- [2] MIŠEK, J., J. KORTÁN a L. KUČERA. Polovodičové zdroje optického záření. Praha: SNTL, 1988
- [3] SALEH, B. E. A. a M. C. TEICH. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1994. ISBN 80-85863-05-7

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 1.6.2023

Vedoucí práce: Ing. Martin Štáva, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miroslav Slouka (VŠB-TUO)

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá měřením charakteristik dvou polovodičových laserových diod (LD) a jeho automatizací. Porovnáván je zde vliv způsobu proudového řízení a teploty LD. První kapitola se věnuje teoretickému základu dílčích oblastí experimentů, je zde provedena rešerše literatury zabývající se řízením laseru pomocí pulzně šířkové modulace (PWM) a uveden způsob realizace měřených experimentů. Druhá kapitola nejprve definuje způsoby přepočtu naměřených dat a stanovuje jejich nejistoty. Následují tři podkapitoly prezentující výsledky jednotlivých experimentů. První experiment se věnuje kontinuálnímu řízení a zbylé dva se zabývají řízením pulzním, jeden pro to používá komerčně dostupný laserový driver a druhý používá spínač navržený primárně pro tuto práci. Závěr práce obsahuje porovnání naměřených výsledků, zhodnocuje jejich využitelnost a navrhuje možná rozšíření této práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

laser, laserová dioda, PWM, CW, automatizace, SCPI, usbtmc, shell script, spektrometr, fotodetektor, laserový driver

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the measurement of the characteristics of two semiconductor laser diodes (LD) and its automation. The effect of current control method and LD temperature is compared here. The first chapter is devoted to the theoretical basis of the sub-areas of the experiments, a literature review dealing with laser control using pulse width modulation (PWM) is carried out, and the method of realization of the measured experiments is presented. The second chapter first defines the methods of recalculating the measured data and determines their uncertainties. The following are three subsections presenting the results of individual experiments. The first experiment deals with continuous control and the other two deal with pulse control, one using a commercially available laser driver and the other using a switch designed primarily for this work. The conclusion of the work contains a comparison of the measured results, evaluates their usability and suggests possible extensions of this work.

KEYWORDS

laser, laser diode, PWM, CW, automation, SCPI, usbtmc, shell script, spectrometer, photodetector, laser driver

FOLTA, Lukáš. *Vliv PWM řízení laserové diody na její charakteristiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2023, 74 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Štáva, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Lukáš Folta
VUT ID autora: 227244
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Vliv PWM řízení laserové diody na její charakteristiky

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Dr. Martinu Šťávovi z Fakulty elektro-techniky na VUT v Brně, Dr. Ladislavu Stankemu z FF UPOL a Ing. Miroslavu Sloukovi z Katedry telekomunikační techniky FEI VŠB-TUO, za ochotu, cenné rady a připomínky.

Obsah

Úvod	17
Cíle práce	19
1 Teoretická část studentské práce	21
1.1 Teorie dílčích oblastí experimentů	21
1.1.1 Radiometrické a fotometrické veličiny	21
1.1.2 Měření radiometrických veličin	23
1.1.3 Princip funkce laseru	25
1.1.4 Módy řízení laseru	27
1.1.5 Teplotní stabilizace	30
1.2 Rozbor výzkumů týkajících se PWM řízení LD	31
1.3 Použité přístroje a jejich automatizace	32
1.3.1 Laserové diody	32
1.3.2 LD driver, TEC kontrolér a LD stojan	33
1.3.3 LD spínač	34
1.3.4 Spektrometr	34
1.3.5 Fotodetektor	36
1.3.6 Ostatní	36
1.4 Realizace experimentů	37
2 Výsledky studentské práce	43
2.1 Obecné problémy měření	43
2.1.1 Korekční křivka vstupu a výstupu ICT 510	43
2.1.2 Nejistoty měření	45
2.1.3 Zkreslení optického průběhu při spínání PWM	50
2.2 Experiment I. CW režim	51
2.3 Experiment II. PWM režim s pomalými hranami	54
2.3.1 Měření s fotodetektorem	54
2.3.2 Měření se spektrometrem	56
2.4 Experiment III. PWM režim s rychlými hranami	59
2.4.1 Měření s fotodetektorem	59
2.4.2 Měření se spektrometrem	60
Závěr	65
Literatura	69

Seznam obrázků

1.1	Funkce spektrální světelné účinnosti $V(\lambda)$ pro různé úrovně adaptačního koeficientu m . [2]	23
1.2	Index lomu taveného křemene jako funkce vlnové délky [8].	25
1.3	Příklad provedení polovodičové GaAs LD [10].	27
1.4	Výkonová charakteristika podle KL, pro LD PLT5 450B [11] (vlevo) a pro LD PLT5 520B [12] (vpravo).	28
1.5	Zobrazení veličin použitých ve vzorci 1.4.	29
1.6	Příklad výkonové charakteristiky podle vzorce 1.4.	30
1.7	Příklad teplotní nestability LD v důsledku PWM řízení [16].	31
1.8	Obvodové schéma LD spínače.	35
1.9	Blokové schéma zapojení měření se spektrometrem v CW režimu, a PWM režimu s pomalými hranami.	39
1.10	Blokové schéma zapojení měření s fotodetektozem v PWM režimu s pomalými hranami.	39
1.11	Blokové schéma zapojení měření se spektrometrem v PWM režimu s rychlými hranami.	40
1.12	Blokové schéma zapojení měření s fotodetektozem v PWM režimu s rychlými hranami.	40
1.13	Algoritmus měření se spektrometrem.	41
2.1	Výkonová charakteristika obou LD v CW režimu s různými teplotami.	51
2.2	Závislost prahového proudu obou LD na jejich teplotě v CW režimu.	52
2.3	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 450B v CW režimu s různými teplotami.	52
2.4	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 520B v CW režimu s různými teplotami.	53
2.5	Relativní optický výkon PLT5 450B v čase jedné periody spínání s PWM (s pomalými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.	55
2.6	Relativní optický výkon PLT5 520B v čase jedné periody spínání s PWM (s pomalými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.	55
2.7	Charakteristika zkreslení optického průběhu vůči kmitočtu PWM (s pomalými hranami) pro obě LD.	56
2.8	Výkonová charakteristika PLT5 450B v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	57
2.9	Výkonová charakteristika PLT5 520B v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	57
2.10	Závislost prahové střídy obou LD na kmitočtu spínání v PWM režimu (s pomalými hranami) pro různé teploty.	57

2.11	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 450B v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	58
2.12	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 520B v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	58
2.13	Relativní optický výkon PLT5 450B v čase jedné periody spínání s PWM (s rychlými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.	60
2.14	Relativní optický výkon PLT5 520B v čase jedné periody spínání s PWM (s rychlými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.	60
2.15	Charakteristika zkreslení optického průběhu vůči kmitočtu PWM (s rychlými hranami) pro obě LD.	61
2.16	Výkonová charakteristika PLT5 450B v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	61
2.17	Výkonová charakteristika PLT5 520B v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	62
2.18	Závislost prahové střídě obou LD na kmitočtu spínání v PWM režimu (s rychlými hranami) pro různé teploty.	62
2.19	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 450B v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	62
2.20	Charakteristika centrální vlnové délky PLT5 520B v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.	63

Úvod

Laserové diody (LD) nacházejí využití v mnoha různorodých odvětvích. Jsou velice žádané především díky vlastnostem, jako je koherentnost laserového svazku, a jeho poměrně velký optický výkon. Uplatnění je nalezeno například v průmyslové výrobě, zdravotnictví, datové komunikaci nebo v kultuře. Vývoj LD má stále velký potenciál a jeho nedílnou součástí je měření nejrůznějších charakteristik.

Tato práce se zabývá měřením výkonových charakteristik (závislost optického výkonu na proudu LD), spolu se závislostmi centrální vlnové délky (CWL) na proudu a průběhy optického výkonu v čase. Zkoumán je i vliv teploty na vybrané charakteristiky. Pro dobrou opakovatelnost měření byla provedena jejich automatizace.

Měření bylo provedeno za pomoci dvou komerčně dostupných polovodičových LD od firmy OSRAM. Ty emitují záření v modré a zelené oblasti viditelného elektromagnetického spektra. Proudové řízení LD bylo provedeno třemi způsoby. Zaprvé pomocí kontinuálního ustáleného proudu, dále referovaného jako CW (continuous-wave) režim. Zadruhé a zatřetí pomocí periodických proudových pulzů se střední hladinou proudu určenou střídou pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM režim). Rozdíl mezi druhým a třetím způsobem řízení spočívá v rychlosti přeběhu proudu mezi pasivní a aktivní hladinou pulzu. Byly použity dva odlišné LD drivery s rozdílnými rychlostmi přeběhu.

Samotná práce je rozdělena do dvou kapitol. První teoretická, ve které jsou informace nezávislé na naměřených datech. Druhá praktická, ve které jsou obsaženy informace zakládající na naměřených datech. V první kapitole je vysvětlen rozdíl mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami, stručně naznačeny způsoby jejich měření, popsán princip funkce laseru, definovány pojmy "prahový proud" a "prahová střída" spolu s teoretickou funkcí pro výpočet středního optického výkonu při PWM řízení s nedokonalými hranami pulzů. Je zmíněn vliv spínání na teplotní stabilitu LD, představeno několik výzkumů věnujících se podobné tématice jako tato práce, a uvedeny přístroje použité pro měření, spolu s možnostmi jejich automatizace. Mezi přístroji je zahrnut i spínač navržený speciálně pro tuto práci. Na konci první kapitoly je vysvětlen způsob realizace měření spolu s jejich blokovými schématy.

Ve druhé kapitole je definován způsob přepočítávání hodnot proudu ze surových dat měření, uvedena teorie nejistot, stanoveny nejistoty pro téměř všechny měřené veličiny a definován způsob určení zkreslení naměřeného průběhu optického výkonu v čase oproti ideálnímu. Zbytek kapitoly se věnuje prezentaci naměřených výsledků dílčích experimentů. V závěru jsou porovnány výsledky z různých módů řízení, navrhována možná rozšíření této práce a zhodnocena její využitelnost.

Cíle práce

Provést rešerši a studium literatury zabývající se principy fungování polovodičových laserů a jejich řízením. Navrhnout a realizovat obvod pro PWM řízení, navrhnout experimenty pro určení vlivu PWM řízení na parametry laserové diody a popsat principy detekce sledovaných parametrů. Zhodnotit využitelnost zjištěných výsledků.

1 Teoretická část studentské práce

V této kapitole je osvětleno teoretické pozadí dílčích oblastí pojících se s realizací experimentů, které je podmínkou pro vhodnou interpretaci naměřených výsledků. Jsou uvedeny některé vědecké práce, týkající se PWM řízení LD a stručně prezentovány měřicí přístroje s důrazem na možnosti jejich automatizace. Na konci této kapitoly jsou vysvětleny realizace měření jednotlivých experimentů a uvedena jejich bloková schémata.

1.1 Teorie dílčích oblastí experimentů

V této podkapitole jsou vysvětleny teoretické základy pro dílčí oblasti experimentů. Jedná se o vysvětlení významu měřených veličin a úvod do používaných metod, technik a přístrojů pro jejich měření. Je uveden princip funkce laseru, spolu se způsoby jeho proudového řízení a popsán vliv náběžných a sestupných hran pulzů na výkonovou charakteristiku při PWM řízení. Nakonec jsou zmíněny různé možnosti teplotní stabilizace LD a popsán vliv pulzního řízení na její teplotní stabilitu.

1.1.1 Radiometrické a fotometrické veličiny

Výrobci "light-emitting diode" (LED) a LD pro specifikaci svých produktů používají jak fotometrické, tak i radiometrické veličiny. Fotometrické jsou používány především pro LED a radiometrické pak pro LD. Nicméně hranice mezi vysokovýkonnými LED a polovodičovými LD je poměrně tenká, proto je při jejich porovnávání dobré mít základní přehled a umět aplikovat převodní vztahy.

Radiometrické veličiny se používají pro popis elektromagnetického záření o všech vlnových délkách. Významnou veličinou je *zářivý tok* (anglicky *radiant flux*), běžně označovaný jako ϕ_e [W] s jednotkou *Watt*, a v této práci referovaný jako optický výkon P_{opt} [W]. Je to množství energie, které uvolní zdroj záření za jednotku času. Další veličinou je *zářivost* (anglicky *radiant intensity*), označována jako I_e [W.sr⁻¹] s jednotkou *Watt na steradián*. Jedná se o optický výkon na jednotku prostorového úhlu, neboli vyzářený optický výkon v určitém směru záření. Zmíněné jednotky patří do kategorie *integrálních*, tj. týkajících se celého spektra měřeného záření. Integrální veličiny je možno derivovat podle vlnové délky, což tvoří kategorii *spektrálních* veličin. Např. *spektrální zářivý tok* $\phi_{e\lambda}$ [W.m⁻¹], který vyjadřuje zářivý tok na určité vlnové délce.

Fotometrické veličiny vyjadřují účinek viditelného záření na lidské oko. Mají jen částečný fyzikální základ a vztahují se pouze na viditelnou část elektromagnetického spektra. Účinek světla na lidské oko je dán jak prostředím, tak subjektivním vnímáním světla, které je pro každého jedince odlišné [1]. Tyto jednotky jsou definovány na základě analytického průzkumu a statistického zpracování získaných dat. Relativnost těchto jednotek je překonána pomocí standardu, který udává převodní charakteristiku mezi fotometrickými a radiometrickými veličinami [2].

Ekvivalentem zářivého toku je pro fotometrické veličiny *světelný tok* (anglicky *luminous flux*), běžně označován jako ϕ_v [*lm*] s jednotkou *lumen*. Ekvivalentem zářivosti je pro fotometrické veličiny *svítivost* (anglicky *luminous intensity*), běžně označována jako I_v [*cd*] s jednotkou *candela*.

Tab. 1.1: Výčet některých radiometrických veličin a jejich fotometrických ekvivalentů.

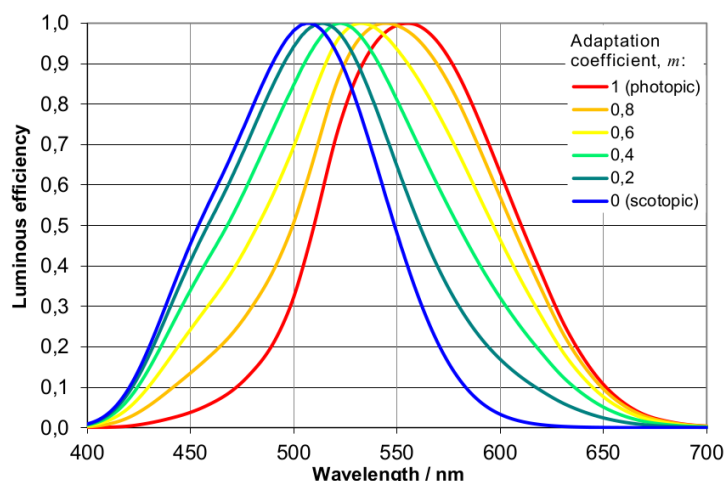
	radiometrická veličina	fotometrická veličina
český název	zářivý tok	světelný tok
anglický název	radiant flux	luminous flux
označení	ϕ_e	ϕ_v
jednotka	<i>W</i>	<i>lm</i>
český název	zářivost	svítivost
anglický název	radiant intensity	luminous intensity
označení	I_e	I_v
jednotka	$W \cdot sr^{-1}$	<i>cd</i>

Vztah mezi fotometrickými a radiometrickými veličinami přímo určuje funkce spektrální světelné účinnosti $V(\lambda)$ viz 1.1. Pomocí ní je možno vyjádřit vzorec pro výpočet svítivosti [2]:

$$I_v = \frac{K_{cd}}{V(\lambda_a)} \cdot \int_{\lambda} I_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad [cd] \quad (1.1)$$

Kde $K_{cd} = 683 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ je konstanta určující maximální možnou světelnou účinnost a $\lambda_a = 555,016 \text{ nm}$ je vlnová délka, na které se zmíněná konstanta určovala.

Pro uchopení funkce $V(\lambda)$ je ještě třeba vzít v úvahu *adaptační koeficient* m . Ten definuje úroveň osvětlení, ve kterém se pozorující subjekt nachází. $m = 1$ vyjadřuje, že se jedná o prostředí s vysokou úrovní osvětlení. $m = 0$ vyjadřuje, že úroveň osvětlení je velmi nízká.



Obr. 1.1: Funkce spektrální světelné účinnosti $V(\lambda)$ pro různé úrovně adaptačního koeficientu m . [2]

1.1.2 Měření radiometrických veličin

Detektory elektromagnetického záření můžeme rozdělit na *tepelné* a *kvantové* [3].

- *Tepelné detektory* zakládají na přeměně zářivé energie na tepelnou.

- *Kvantové detektory* spoléhají na interakci fotonů s elektrony materiálu detektoru. Využívají vnějšího či vnitřního *fotoelektrického jevu*.

- *Vnější fotoelektrický jev* je proces typický pro vodivé materiály, při kterém energie fotonů, předaná elektronům v materiálu způsobí, že některé elektrony mají dostatek energie, aby mohly opustit materiál. Podobný proces se děje ve vakuových elektronkách, jen s tím rozdílem, že potřebná energie je elektronům dodána ve formě tepla zevnitř materiálu.

- *Vnitřní fotoelektrický jev* je proces, typický pro polovodičové materiály, při kterém dochází k ionizaci elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Na základě tohoto jevu pracuje většina fotodetektorů.

Fotodetektor

Fotodioda je elektronická součástka s polovodičovým PN přechodem uzpůsobeným pro dopad světla. Polarizace fotodiody v propustném směru se používá převážně pro převod světelné energie na elektrickou, a v takovém případě se fotodioda nazývá *fotovoltaický článek* (FČ). Je sice možné na základě generovaného proudu či napětí detekovat záření, určité mechanismy však brání FČ v rychlé reakci na rychlé změny dopadajícího záření. Maximální kmitočet dobře detekovaného záření FČ je v řádech desítek kHz [4]. Nosiče vygenerované osvětlením po jeho vypnutí nejsou přitahovány

vnějším elektrickým polem, a zůstávají v polovodiči po dobu odpovídající době života minoritních nosičů.

V případě závěrné polarizace jsou vygenerované nosiče po vypnutí osvětlení okamžitě odstraněny vnějším elektrickým polem. Takto zapojená fotodioda je nazývána fotodetektozem. Pro ještě rychlejší reakční dobu fotodetektoru se zavádějí do polovodiče rekombinační centra [4], ve kterých můžou generované nosiče rekombinovat, zatímco ostatní generované nosiče jsou odsávány vnějším elektrickým polem.

CCD

CCD neboli *charge-coupled device* je elektronická součástka sloužící pro snímání obrazu. Používá se například v kamerách či spektrometrech. Jedná se o 2D matici fotodetektorů, technologicky uzpůsobených k tomu, aby je bylo možné multiplexovat. Lineární 1D uspořádání fotodetektorů se nazývá fotodiodová řada [5]. Nicméně takovéto uspořádání je výrobcí také běžně považováno za CCD [6]. Základní prvek výsledného obrazu, *pixel*, je definovaný intenzitou ozáření, dobou expozice a polohou daného fotodetektoru. Po postupném získání celého vektoru těchto informací lze dosáhnout složení celého snímaného obrazu.

Spektrometr

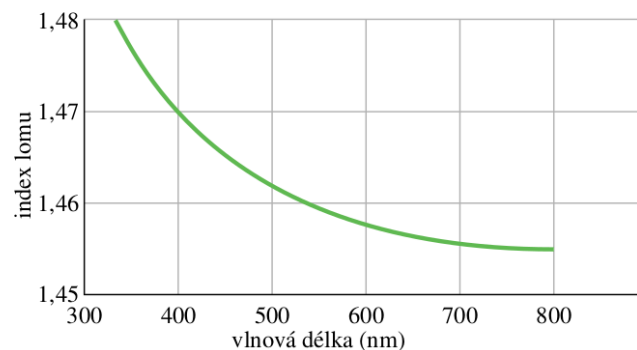
Spektrometr je zařízení, které dokáže naměřit závislost spektrálního optického výkonu (viz 1.1.1) na vlnové délce zkoumaného záření. Jinak řečeno, měří intenzitu záření pro parciální vlnové délky v rozsahu vlnových délek, pro které je zařízení určeno.

Takové zařízení, určené pro měření viditelného záření, typicky obsahuje optickou soustavu pro přenos optického signálu od zdroje, přes různé funkční prvky, až po snímač, např. CCD. Snímač převede zkoumaný světelný signál na elektrický a ten je dále zpracováván analogovými a digitálními obvody. Tyto přístroje obvykle bývají vybaveny vysokorychlostními ADC převodníky s vysokým rozlišením a rychlými FPGA či ASIC IC pro zpracování dat.

Mezi funkčními prvky optické soustavy je velmi důležitý disperzní element, jehož účelem je rozložit spojité spektrum záření na jednotlivé vlnové délky. K tomu může posloužit disperzní hranol, který využívá jevu chromatické disperze podle *Snellova zákona lomů*. Ten se však používá jen zřídka, a to kvůli nelineární závislosti indexu lomu materiálů na vlnové délce záření, viz 1.2.

Častěji se používá difrakční mřížka, která využívá jevu difrakce a interference záření. Disperze difrakční mřížky má lineární závislost na vlnové délce záření [7].

Mezi další optické prvky je možno řadit zrcadla, optické kabely či kolektory záření. Výsledný instrument pak vypadá tak, že je na jeho vstupu kolektor, který směřuje záření dovnitř spektrometru. Tam je záření pomocí optické soustavy nasměřováno na difrakční mřížku. Ta rozloží záření na jednotlivé vlnové délky, a jejich intenzita je nakonec měřena pomocí CCD, které na základě polohy může určit vlnovou délku. Další možností realizace spektrometru je např. za pomoci rozšíření propustné vlnové délky monochromátoru, což je zařízení propouštějící záření pouze jedné vlnové délky.



Obr. 1.2: Index lomu taveného křemene jako funkce vlnové délky [8].

1.1.3 Princip funkce laseru

Slovo LASER je akronym ze slovního spojení "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", tedy v překladu "zesilování světla pomocí stimulované emise záření". Existují dva druhy emise záření: *stimulovaná* a *spontánní*.

Spontánní emise

Je dán materiál, ve kterém se částice (např. elektron) může pohybovat jen po diskretních energetických hladinách. V daném materiálu se nachází tyto hladiny pouze dvě. Hladina E_1 s nižší energií, hladina E_2 s vyšší energií. Částice se nachází na hladině E_1 . Pokud je částice vybudena dostatečným množstvím energie, může se ocitnout na hladině E_2 . Částice má však tendenci se vrátit na svoji základní hladinu. Při přechodu částice z E_1 do E_2 uvolňuje získanou energii buď ve formě tepla (nezářivá emise) nebo fotonů (zářivá emise). Pokud jde o emisi zářivou, pak je kmitočet elektromagnetického záření popsán tímto vztahem: [9].

$$f = \frac{(E_2 - E_1)}{h} [Hz] \quad (1.2)$$

Kde h je Planckova konstanta. Generování fotonů probíhá v této situaci náhodně a náhodnými směry.

Stimulovaná emise

Pokud se částice nachází na hladině E_2 a současně na ní působí elektromagnetická vlna o kmitočtu f (viz rovnice 1.2), je do nějaké míry pravděpodobné, že toto záření způsobí přechod částice na nižší hladinu. Přitom se uvolní další foton se stejnou fází, kmitočtem a směrem jako záření, které přechod způsobilo. Tento přechod se nazývá *stimulovaná emise*.

Inverzní populace

Hladina E_2 je *metastabilní hladina* - částice na ni zůstanou jen nějakou dobu a mají tendenci se vrátit na svou původní stabilní hladinu E_1 . Počet částic na metastabilní hladině je určen množstvím energie, která je budí, a také dobou života částice na metastabilní hladině. Ta je charakteristickou vlastností buzeného materiálu.

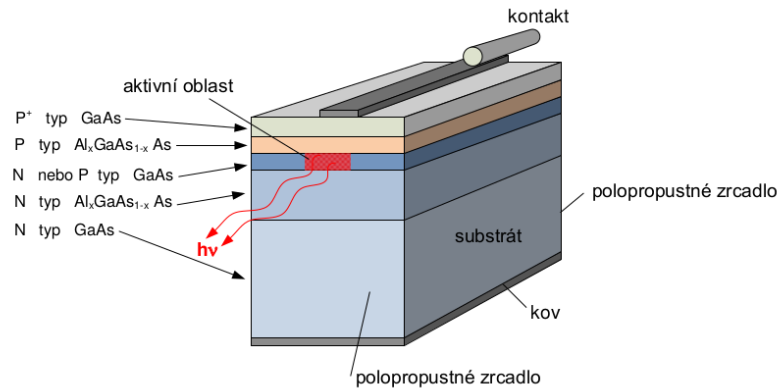
Inverzní populace se nazývá stav, kdy se na metastabilní hladině nachází více částic než na stabilní hladině. Doba života částice většiny materiálů je natolik krátká, že množství budící energie nutné pro dosažení inverzní populace je nad současnou technologickou možnost. Existují však materiály, které mají dobu života částice na metastabilní hladině natolik dlouhou, že se v nich inverzní populace dosáhnout dá. Takovéto materiály označujeme jako *aktivní prostředí*. Mezi zástupce takových látek patří např. $He - Ne$, CO_2 (plynné), YAG , $GaAs$ (pevnolátkové) [10].

Provedení laseru

Právě inverzní populace je podmínkou pro vznik laserového záření. Fotony prvotní spontánní emise se sebou strhávají částice z vyšší hladiny, což způsobuje stimulovanou emisi fotonů, které mohou vyvolat další stimulovanou emisi a tak dále. Protože je díky aktivnímu prostředí a buzení udržována inverzní populace, je stále dost částic, které mohou podlehnout stimulované emisi. Vzniká tak koherentní monochromatický laserový svazek.

Pro umocnění tohoto lavinového efektu je aktivní prostředí typicky umístěno mezi

dvě zrcadla. Toto uspořádání se nazývá *rezonátor*. Délka a tvar rezonátoru jsou důležitými parametry pro vznik laserového svazku. Nenulová propustnost použitých zrcadel zajišťuje, že záření může opustit rezonátor.



Obr. 1.3: Příklad provedení polovodičové GaAs LD [10].

1.1.4 Módy řízení laseru

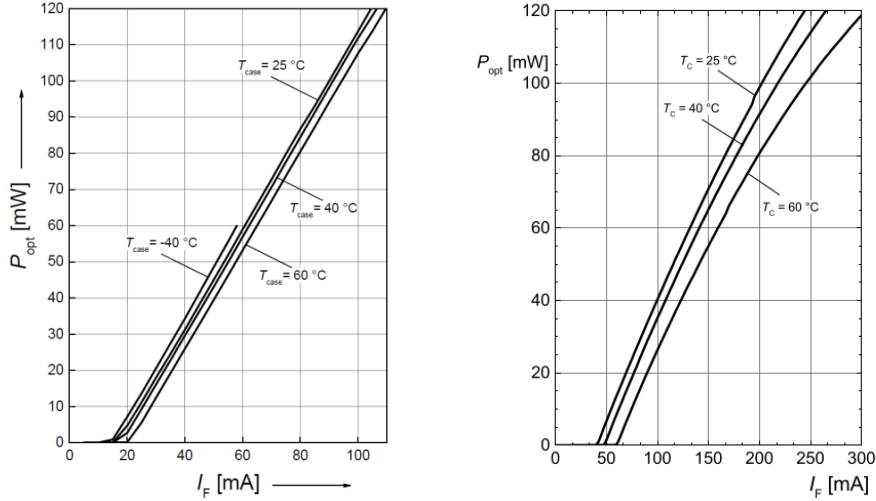
CW

CW (*continuous wave*) je chápáno jako řízení, kdy LD protéká konstantní ustálený proud. Velikost optického výkonu v tomto módu je dána W-A charakteristikou LD, ta je ovšem nelineární a znatelně se mění s měnící se teplotou LD, viz 1.4. Nastavení požadovaného optického výkonu bez zařízení se zpětnou vazbou může být obtížné a nepřesné.

V CW režimu je důležitým pojmem *prahový proud*, jelikož v tomto bodě začíná docházet ke stimulované emisi. Je možno ho určit jako bod, ve kterém se protíná aproximace výkonové charakteristiky LD v oblasti spontánní emise a aproximace výkonové charakteristiky LD v oblasti stimulované emise.

PWM

Pulzní řízení laserů je možno rozdělit na dvě kategorie: *jednorázovým pulzem* a *periodickými pulzy*. První zmíněný způsob se používá k jednorázové aplikaci přesné dávky energie na požadované místo. Uplatnění má například při gravírování kovů, kdy se do kovu pulzně vypálí jeden bod, poté přejede hlavička s laserem na novou lokaci a vypálí tam druhý bod a tak dále. Specifické pro tento způsob je, že se délka pulzu vyjadřuje časem.



Obr. 1.4: Výkonová charakteristika podle KL, pro LD [PLT5 450B](#) [11] (vlevo) a pro LD [PLT5 520B](#) [12] (vpravo).

Oproti tomu při periodickém pulzním řízení je délka pulzu dána střídou PWM a jejím kmitočtem. Střída zde udává střední hodnotu proudu procházejícího LD a pomocí ní je možno v PWM režimu vyjádřit i jistou obdobu W-A charakteristiky.

V ideálním případě, kdy je tvar průběhu proudu perfektně pravoúhlý a čas náběžné a sestupné hrany (doba za kterou proud přejde z nuly do svého maxima a naopak) je nulový, se dá střední proud jedné periody a jejich celočíselných násobků vyjádřit jednoduše: $I_s = I_{max} \cdot (w_{ld}/100)$ [A]. Kde I_s [A] je střední proud, I_{max} [A] je maximum proudu a w_{ld} [%] je střída. Závislost středního proudu na střídě, je čistě lineární. Začíná od nuly a končí v hodnotě maximálního proudu. Stejný vzorec by platil i pro závislost optického výkonu na střídě: $P_s = P_{max} \cdot (w_{ld}/100)$ [W].

V reálném světě je ale pravoúhlý průběh proudu nedosažitelný. Doby náběžné a sestupné hrany budou vždy nenulové. Nicméně nedílnou součástí PWM je i kmitočet modulace, díky kterému je možno dosáhnout zdánlivě pravoúhlého průběhu, i když je doba hran nenulová. Podmínkou toho je, aby doba periody modulace $t_{pwm} = 1/f_{pwm}$ [s], byla výrazně vyšší než doba hran t_{edg} .

$$P_s(w_{ld}) \approx P_{max} \cdot (w_{ld}/100) [W], \text{ pro } t_{pwm} \gg \gg t_{edg} \quad (1.3)$$

Pokud se počítá s dobou hran pulzů t_{edg} i dobou střídý $t_{w_{ld}} = w_{ld}/(f_{pwm} \cdot 100)$ [s], která je závislá na kmitočtu PWM, pak je možno závislost středního výkonu na střídě popsat ještě přesněji. Pokud je doba střídý kratší nežli doba hrany, pak se optický výkon nestihne dostat do svého maxima. Za takových podmínek bude střední výkon menší než v ideálním případě. Podobně pokud je doba střídý delší nežli doba periody bez doby hrany, pak se optický výkon nestihne dostat do svého minima.

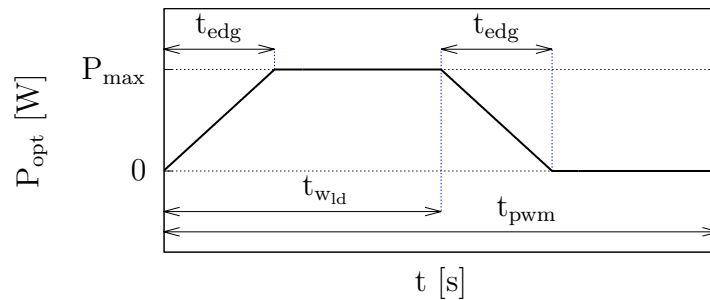
Za takových podmínek bude střední výkon vyšší než v ideálním případě. Pro matematické vyjádření tohoto chování je třeba vymezit několik podmínek.

- Zaprvé doba nástupné hrany je rovna době sestupné hrany: $t_{rise} = t_{fall} = t_{edg}$.
- Zadruhé tvar přeběhu hran je považován za lineární. To je dobrým kompromisem mezi reálným přeběhem a složitostí aproximujícího vzorce.
- Zatřetí není brána v potaz nelineárnost výkonové charakteristiky LD. Průběh relativního optického výkonu má stejný tvar jako průběh proudu LD: $I_s(w_{ld}) \approx P_s(w_{ld})$. Takové zjednodušení se může projevit při nízkých střídách, kde hraje velkou roli prahový proud.

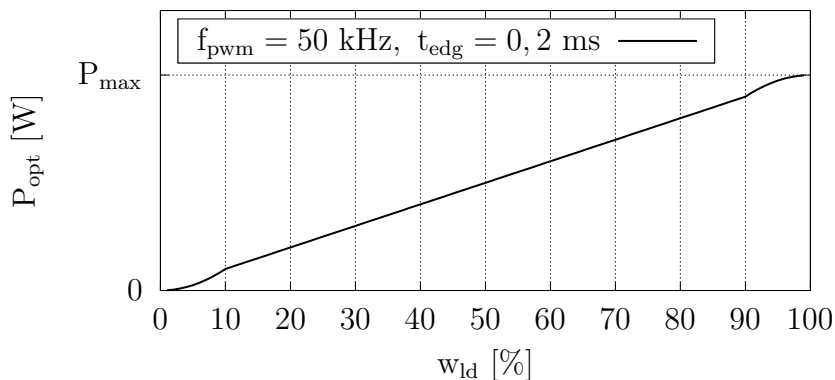
Za těchto okolností je možno reálnou závislost optického výkonu na střídě aproximovat pomocí funkce:

$$\begin{aligned}
 P_s(w_{ld}) &= t_{w_{ld}}^2 \cdot \frac{P_{max}}{t_{edg}} [W], \text{ pro } t_{w_{ld}} \in \langle 0, t_{edg} \rangle \\
 &= t_{w_{ld}} \cdot P_{max} [W], \text{ pro } t_{w_{ld}} \in \langle t_{edg}, t_{pwm} - t_{edg} \rangle \\
 &= (t_{pwm} \cdot P_{max}) - \frac{P_{max}}{t_{edg}} \cdot (t_{pwm} - t_{w_{ld}})^2 [W], \text{ pro } t_{w_{ld}} \in \langle t_{pwm} - t_{edg}, t_{pwm} \rangle
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Zobrazení použitých veličin je uvedeno v grafu 1.5, a příklad průběhu teoretické výkonové charakteristiky 1.4 v grafu 1.6. Ekvivalentem *prahového proudu* v CW režimu je pro PWM režim *prahová střída*, ta je určena jako bod, ve kterém výkonová charakteristika LD v PWM režimu dosahuje nulového optického výkonu. Také se jedná o přechod ze spontánní do stimulované emise. Náběžná hrana proudového pulzu totiž před *prahovou střídou* nedosahuje nad *prahový proud* a v LD se tak odehrává pouze spontánní emise.



Obr. 1.5: Zobrazení veličin použitých ve vzorci 1.4.



Obr. 1.6: Příklad výkonové charakteristiky podle vzorce 1.4.

1.1.5 Teplotní stabilizace

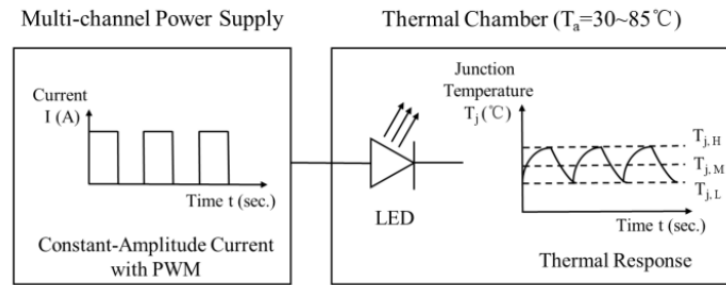
Teplotní stabilizace laserů se může provádět různými způsoby. Záleží na velikosti a výkonosti laseru. Pro polovodičové laserové diody stačí regulace pomocí peltierova článku (thermo electric cooler: TEC) a teplotního senzoru (TS). Jednou ze zajímavých možností je integrovat TEC a TS přímo do pouzdra s LD [13]. Další možností je implementovat TEC a TS vně pouzdra LD, avšak zajistit mezi nimi dobrou tepelnou konduktivitu.

Pro ovládání TEC a TS jsou používána zařízení označována jako TEC drivery. Ty za pomoci zpětnovazební smyčky s TS nastavují proud, který protéká přes TEC tak, aby bylo docíleno požadované teploty. Externí stabilizace teploty LD může být poměrně pomalý proces a může se pohybovat v řádech minut.

Teplota LD může ovlivňovat nejen vyzařovaný výkon, ale také vlnovou délku záření, a to v důsledku měnících se fyzických proporcí rezonátoru.

TEC, pouzdro LD a rezonátor představují komplexní termodynamický systém. Při řízení LD pomocí PWM osciluje teplota rezonátoru kolem ustálené hladiny určené teplotou pouzdra popř. chladiče. Odchylku teplotní oscilace od ustálené hladiny určuje jak tepelná konduktivita mezi rezonátorem a zbytkem systému, tak kmitočet PWM. S klesajícím kmitočtem odchylka roste. Příklad teplotní oscilace pro jeden kmitočet PWM je uveden na obrázku 1.7.

Velká teplotní odchylka by mohla mít za následek nestálý optický výkon či vlnovou délku záření. Vliv na intenzitu fyzické námahy LD v důsledku měnící se teploty má jak velikost teplotní odchylky, tak i kmitočet PWM (počet teplotních oscilací za určitou dobu).



Obr. 1.7: Příklad teplotní nestability LD v důsledku PWM řízení [16].

1.2 Rozbor výzkumů týkajících se PWM řízení LD

Tato bakalářská práce je v první řadě rozšířením diplomové práce Ing. Slouky [14], ten se ve své práci zabýval měřením světelného toku a spektra LD v CW a PWM režimu. Dále prostorovou svítivostí LD v CW a PWM režimu. Tato práce se nezabývá měřením prostorové svítivosti, nicméně rozšiřuje měření optických veličin o použití několika různých kmitočtů PWM, několika různých teplot LD, měření optického průběhu v čase při PWM řízení, a také je zde provedeno měření s novým, rychlejším PWM driverem.

Ve zmíněné práci Ing. Slouka uvádí, že "pomocí PWM lze přivést LD do laserového režimu při nižším světelném toku, než u CW režimu".

Jednou z dalších prací zabývajících se PWM řízením LD je článek "Development and implementation of a laser headlight system for electro-optic characteristic measurement and comparison"[15]. Lin Ch. se zde zabývá opto-eletrickým systémem pro měření charakteristik automobilových laserových světlometů. Pro PWM řízení LD, Lin Ch. používá DC-DC buck-boost konvertor. Dále tímto systémem porovnává optický výkon a efektivitu přeměny elektrické energie na optickou v CW a PWM režimu s kmitočtem 400 Hz. Výsledky měřicího systému ukázaly, že výkonová charakteristika v PWM režimu nebyla lineární, na což v jeho článku není upozorněno. Nicméně jedním z jeho závěrů je, že řízení v PWM režimu je efektivnější než v CW režimu.

Poslední uvedenou prací je "Lifetime and Failure Analysis of LEDs Driven by the Constant-Amplitude Current with Pulse Width Modulation"[16]. Zhao F. zde řídí LED pomocí laboratorního zdroje proudu a PWM s maximálním kmitočtem 500 Hz. Jeho závěr uvádí, že při PWM řízení se ještě před poklesem svítivosti LED na hodnotu určující její životnost, objevila různá fatální selhání, jako je například přetržení kontaktních dráktů na chip.

1.3 Použité přístroje a jejich automatizace

Problematické dílčích experimentů je věnovaná podkapitola "Realizace experimentů", viz 1.4. Nicméně pro vysvětlení motivace, proč měření automatizovat, je nastíněn jejich charakter již zde.

Požadovaným výstupem experimentů je několik závislostí. Například $W-A$, neboli výkonovou charakteristiku, čili závislost optického výkonu na procházejícím proudu. Takových charakteristik je potřeba hned několik. Tato měření byla zkomplikována požadavkem na stabilní teplotu LD. Z toho vyplývá, že každá inkrementace proudu či zhasnutí a rozsvícení LD v průběhu experimentu, narušila teplotní stabilitu LD. Poté bylo třeba čekat na její ustálení. To mohlo s použitým TEC kontrolérem trvat od jednotek sekund až po minuty, v závislosti na velikosti procházejícího proudu. Velkou částí doby měření jedné charakteristiky bylo čekání na ustálení teploty. Každé měření bylo časově náročné, což bylo dobrou motivací pro jeho automatizaci. Dalším důvodem byla také jeho dobrá opakovatelnost.

Některé praktiky automatizace použité v této práci byli poměrně nestandardní. Jmenovitě se jednalo o ovládání LD driveru pomocí analogových IO portů. Bylo totiž nutné vypořádat se s rozdílností hodnot mezi kontrolním vstupem, interním ampérmetrem a kontrolním výstupem. Toho bylo docíleno za pomoci korekčních křivek (viz 2.1.1), které redukovaly nepřesnosti IO portů. Další nestandardní praktikou bylo programování uživatelského rozhraní počítačové myši a klávesnice, za účelem ovládání grafického rozhraní spektrometru. To je hlavním důvodem špatné přenositelnosti automatizovaného systému na různé platformy.

1.3.1 Laserové diody

Předmětem měření byly dvě LD od firmy OSRAM. Zelená **PLT5 520B** a modrá **PLT5 450B**. Obě diody disponují pouzdrem TO56 a aktivním prostředím tvořeným materiálem InGaN [17]. Výpis důležitých vlastností, uvedených v KL [12] [11], je v tabulce 1.2.

Maximální hodnoty proudu pro měřené experimenty byly stanoveny na 220 mA pro **PLT5 520B** a 150 mA pro **PLT5 450B**. V KL **PLT5 520B** je uveden graf I_{max} v závislosti na teplotě, ve kterém je I_{max} pro teplotu 60 °C: 220 mA. V KL **PLT5 450B** tento graf není uveden, a tak je použita o 15 mA nižší hodnota, než se nachází v tabulce "Maximum Ratings:" $I_F = 165 \text{ mA}$.

Tab. 1.2: Výčet důležitých vlastností obou LD.

	PLT5 520B	PLT5 450B
λ_p [nm]	515-530	440-460
$P_{opt_{max}}$ [mW]	110	100
I_{max} [mA]	330	165

Použité LD nedisponují integrovanou teplotní stabilizací a senzoricou v pouzdře.

1.3.2 LD driver, TEC kontrolér a LD stojan

Pro experimenty byl použit přístroj Thorlabs ICT 510, implementující jak LD driver, tak i TEC driver. Použitá verze přístroje nedisponuje IEEE-488 rozhraním, ale pouze dvěma IO BNC konektory.

Vstup "MOD IN" slouží pro nastavení proudu LD pomocí napětí. Jeho modulační koeficient je $100 \text{ mA/V} \pm 5\%$ [18]. Pokud je například na tento vstup přivedeno napětí 1 V , bude LD protékat proud $(100 \pm 5) \text{ mA}$. Nejistota tohoto vstupu je poměrně velká. Vliv této nejistoty byl potlačen naměřením kalibrační křivky 2.1.1 a její aplikací na surová data z měření.

Výstup "ANALOG OUT" slouží k zobrazení aktuálního proudu LD. Jeho přenosový koeficient je $10 \text{ V/A} \pm 5\%$ [18]. I zde bylo přistoupeno k aplikaci korekční křivky. LD driver mimo jiné disponuje ochranou LD zvanou "soft start"[18]. Tato funkce chrání LD před velmi rychlými přechody proudu. Nicméně byla také důvodem, proč byly hrany pulzů v PWM režimu poměrně pomalé. Přímo tak omezovala horní použitelný kmitočet PWM.

Pro použití jak TEC kontroléru, tak i LD driveru je potřeba dedikovaný LD stojan. K dispozici byl stojan od stejné značky, typ TCLDM9 [19]. Ten kromě jiného disponuje ovládacím rozhraním kompatibilním s ICT 510, termistorem a peltierovým článkem. Konstrukce stojanu umožňuje vložené LD dobrý přenos tepla z kovového pláště pouzdra TO56 do měděného chladiče, opatřeného jak termistorem, tak peltierovým článkem. Teplotní stabilizace sice není tak kvalitní jako v případě integrace potřebných prvků v pouzdře LD, avšak při dostatečně dlouhém čekání na ustálení teploty, se dá považovat za spolehlivou.

TEC kontrolér nedisponuje žádnou možností nastavení požadované teploty a její kontroly než manuální. Nastavení teploty ale nebylo zas tak častým požadavkem, jako nastavení proudu LD, a proto nebylo nutné tuto funkci automatizovat.

1.3.3 LD spínač

Jak už bylo předesláno v sekci "LD driver, TEC kontrolér a LD stojan" 1.3.2, tak LD driver od firmy Thorlabs má při spínání poměrně pomalé hrany proudových pulzů. To s sebou přineslo některé problémy popsané v subsekci "Módy řízení laseru" 1.1.4. Aby bylo dokázáno, že se těmto problémům dá vyhnout, tak byl navržen dedikovaný LD driver.

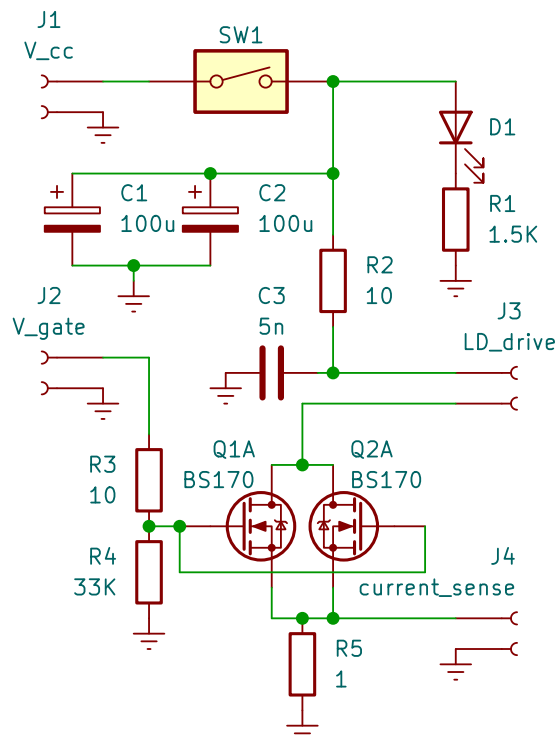
Hlavní prioritou byl co nejvyšší dosažitelný modulační kmitočet. Design driveru je proto velmi jednoduchý. Jeho základem je DMOS spínač s pasivní zátěží a několika dalšími obvodovými prvky. K tomuto spínači jsou připojeny laboratorní přístroje. Lab. zdroj pro nastavení proudu a aktivní hladiny pulzu. Lab. generátor napětí pro spínání hradla. A osciloskop pro snímání proudu v aktivní hladině pulzu.

Obvodové schéma spínače je uvedeno na obrázku 1.8. Prvky SW1, D1 a R1 slouží čistě pro usnadnění práce se spínačem. Oddělovací (decoupling) kondenzátory C1 a C2 slouží ke kompenzaci šumu a výkyvů na vstupním napájecím napětí V_{cc} . Rezistor R2 slouží jako proudový zdroj pro LD a současně stabilizuje teplotní závislost dynamického odporu spínacích tranzistorů a LD. Kondenzátor C3 stabilizuje proudové zákmity při spínání LD. Jeho hodnota byla určena experimentálně. Spínací prvek tvoří dva paralelně zapojené DMOS unipolární tranzistory BS170 [20] v pouzdře TO-92. Tento tranzistor byl zvolen kvůli jeho snadné dostupnosti, a dobrým dynamickým vlastnostem. Paralelní zapojení zvyšuje výkonovou zatížitelnost spínače. R4 je pull-down pro hradla spínacích tranzistorů. Tzn. zajišťuje, že hradla nemohou být plovoucí a že se na nich nenahromadí náboj, který by je mohl sepnout. R3 je ochrana hradel. A nakonec na R5 se měří úbytek napětí způsobený proudem procházejícím LD.

Pro zapojení LD byl vytvořen kabel korespondující s rozhraním stojanu. Obvod spínače byl realizován pomocí děrované DPS a THT součástek. Navržený LD driver se zmíněným spínačem je vhodný pouze pro experimentální účely. Návrh LD driveru pro PWM řízení praktických aplikací by měl obsahovat nastavitelný proudový zdroj a interní generátor spínacího napětí.

1.3.4 Spektrometr

Pro měření spektrálních veličin byl použit spektrometr od firmy Avantes, typ AvaSpec HS2048XL-EVO [21]. Ten disponuje back-thinned CCD obrazovým detektorem s rozlišením 2048 pixelů, měřitelným spektrem od 200 nm do 1100 nm , dynamickým rozsahem 14,9 a nastavitelným integračním časem 2 μs – 600 s . Snímání světla bylo provedeno za pomoci pasivní integrační koule AvaSphere-50-IRRAD [22] s téměř



Obr. 1.8: Obvodové schéma LD spínače.

99% odrazivosti vnitřního povrchu, kterou ke spektrometru připojoval optický kabel. Jako rozhraní pro ovládání spektrometru posloužil program AvaSoft 8.11 [23]. V manuálu přístroje je uvedeno jen několik nedostačujících možností, jak ho automatizovat. Jedná se o funkci "Time Series" [24]. Ta umožňuje pouze ukládání naměřeného spektra po určitých časových intervalech. A také o funkci "Save Spectra on Digital Input" [25], která uloží spektrum při aktivaci některých z pinů na digital IO HD-26 konektoru. Jiné možnosti sofistikovanější automatizace nejsou popsány jak v manuálu spektrometru, tak ani v manuálu softwaru. Jediná potenciální možnost, jak tento měřicí přístroj vhodně automatizovat, je přikoupit si balíček "AvaSpec-DLL Windows and Linux interface packages" [26]. Druhá možnost je automatizovat uživatelský input, který ovládá zmíněné GUI. Toto řešení bylo použito v této práci, jelikož zmíněný balíček nebyl pro měření dostupný. Detaily použitého přístupu jsou uvedeny v sekci "Realizace experimentů" 1.4.

1.3.5 Fotodetektor

Pro měření průběhu relativního optického výkonu laserového svazku v čase jedné periody PWM byl použit aktivní fotodetektor od firmy Thorlabs, typ PDA36A2 [27]. Ten je určený pro měření viditelného spektra od 350 nm do 1100 nm . Výkon laserového svazku je natolik velký, že nebylo potřeba používat zesilovač vestavěný ve fotodetektoru. Šířka pásma je pro úroveň amplifikace 0 dB : 12 MHz . Vzhledem k tomu, že kmitočty PWM nepřesáhly 1 MHz , a k tomu, že by fotodetektor dokázal zachytit i několik vyšších harmonických obdelníkového signálu o kmitočtu 1 MHz , lze říct, že šířka pásma tohoto senzoru je vyhovující. Výstupní napětí detektoru bylo přivedeno na vstup osciloskopu.

1.3.6 Ostatní

Zdroj napětí

LD spínač byl připojený na laboratorní zdroj napětí od firmy MANSON, typ HSC-3200 [28]. Ten sice disponuje programovatelným rozhraním, pro měřené experimenty jej ale nebylo třeba využít.

Osciloskop

Pro měření úbytku napětí odpovídajícího proudu LD, a také pro měření výstupu fotodetektoru, byl použit osciloskop od firmy Tektronic, model TDS2002B [29]. Přístroj má šířku pásma 60 MHz a samplovací rychlost 1 GSa/s , což je dostačující. Nejistota přístroje je $\pm 3\%$ na vertikální ose a 50 ppm na horizontální. Důležitou součástí tohoto osciloskopu je programovatelné RS-232 rozhraní, které se dá ovládat přes USB port.

Generátor napěťových průběhů

Pro nastavování proudu v CW režimu a spínání v PWM režimu byl použit generátor libovolných napěťových průběhů od firmy RIGOL, typ DG1032Z [30]. S maximálním kmitočtem 30 MHz , vzorkovacím kmitočtem 200 MSa/s , vertikálním rozlišením 14 bitů, šířkou pulzu nejméně 16 ns a hranami pulzu delšími jak 10 ns . Generátor je programovatelný pomocí USB.

1.4 Realizace experimentů

Tato práce se zabývá třemi experimenty: 1. měření v CW režimu, 2. měření v PWM režimu s pomalými hranami pulzu (s THOR LD driverem), 3. měření v PWM režimu s rychlými hranami pulzu (se spínačem). Cílem experimentů bylo naměřit několik charakteristik LD a porovnat je mezi různými způsoby řízení. Jednalo se o W-A charakteristiky a závislosti centrální vlnové délky na proudu resp. střídě PWM. K tomu byl sledován vliv teploty LD a kmitočtu PWM. Z těchto charakteristik bylo poté možné zobrazit závislost prahového proudu či střídě, na teplotě LD nebo kmitočtu PWM.

Toto zadání indikuje velké množství měřených dat a časovou náročnost, kvůli pomalé teplotní stabilizaci (viz 1.3.2). Jak bylo zmíněno, toto měření je velmi výhodné do určité míry automatizovat. Možnosti automatizace jednotlivých přístrojů byly popsány v sekci 1.3. Ve zkratce bylo nutné ovládat dvě USB rozhraní a uživatelský input (myš a klávesnice).

Pro kontrolu USB portů byl použit ovladač `usbtc`, který je implementovaný v samotném linuxovém jádře [31]. Ten funguje tak, že jakmile je k PC připojeno zařízení spadající do třídy `usbtc`, pak OS vytvoří soubor typu "znakové zařízení" a do něj je pak možné zapisovat a číst z něj jako z normálního souboru. Například sekvence dvou příkazů `echo 'IDN?' > /dev/usbtc1 ; cat /dev/usbtc1` vypíše do standardního výstupu odpověď přístroje na identifikační požadavek "IDN?", který je jedním z univerzálních příkazů SCPI standardu. Do souboru `usbtcX` je možné zapisovat a číst z něj i pomocí jazyka C nebo jiných programovacích jazyků.

Pro tuto práci byl zvolen skriptovací jazyk "shell script". Jeho silnou výhodou je schopnost pracovat se všemi CLI programy, které se na daném OS vyskytují. To se děje díky tomu, že všechny CLI programy do jisté míry pracují se speciálními soubory `stdin` a `stdout`. Například pokud je třeba použít program `find` pro nalezení souboru, nabízí se několik možností. Buď se dá použít přepínačů daného programu, které je možno najít pomocí příkazu `man find`. A nebo lze zaměstnat i program `grep` a příkaz zformulovat např. takto `find / | grep 'soubor'`. Příkaz `find /` vypíše rekurzivně všechny soubory v kořenovém adresáři i s jejich absolutní cestou. Každý na jeden řádek. A tento výstup pošle do souboru `stdout`. Ten je standardně namapován na konzoli, nicméně symbol `/` ho přesměruje na `stdin` programu `grep`, který má za úkol najít řádek, na kterém se vyskytuje řetězec `soubor`. Nevýhodou shell scriptu může být vysoká režie při zpracovávání velkého objemu dat nebo poměrně nekonzistentní interpretace znakových řetězců (speciální znaky pro komunikaci s terminálem).

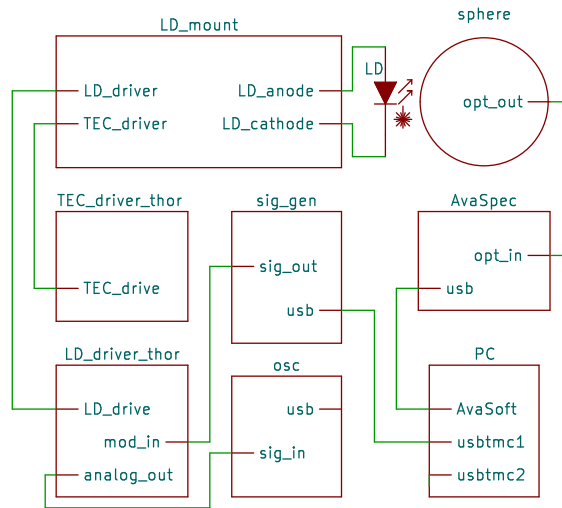
Pro měření byl použit OS *Ubuntu 18.04 LTS*. Program *Avasoft* nutný pro ovládání spektrometru je dostupný jen na *Windows 7* a jeho novějších verzích. Tento problém byl vyřešen spuštěním virtuálního počítače s *Windows 7* pomocí programu *Oracle*

VM VirtualBox. Uživatelský input (ovládání myši a psaní na klávesnici) byl ovládán z hostujícího OS za pomoci programu *xdotool*.

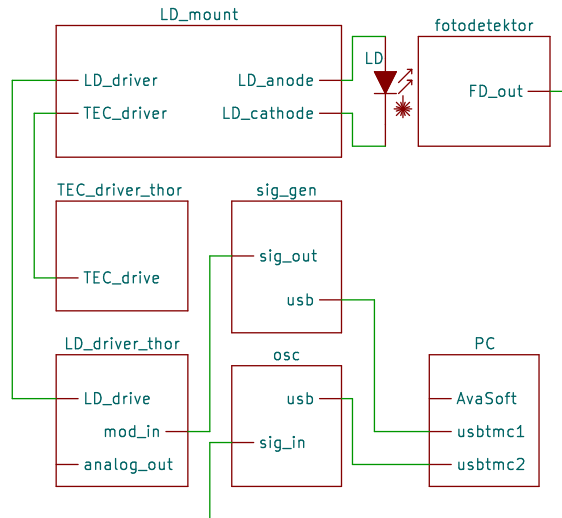
Automatizovaný systém fungoval následovně. Na popředí hostujícího OS byl spuštěn virtuální počítač s otevřeným programem *Avasoft*. Na jeho pozadí běžel skript, který posílal příkazy do generátoru, ovládal spektrometr pomocí GUI ve VM a četl data naměřená spektrometrem pomocí sdíleného úložiště mezi hostem a VM.

Programování GUI pomocí skriptování uživatelského inputu s sebou nese velké nevýhody. Za prvé není možnost (pokud vynecháme analýzu obrazu), jak získat zpětnou vazbu. Například pokud je nutno uložit výsledky měření. To se sebou nese tři operace. Kliknutí na ikonu, které otevře dialog. Zapsání požadovaného jména souboru. A nakonec kliknutí na ikonu uložení. Po každé operaci se čeká např. 0,6 sekundy na odezvu (protože nefunguje zpětná vazba, a program neví, kdy byla operace dokončena), než je přistoupeno k další operaci. Když se však plánovač procesů rozhodne neudělit programu dostatek procesorového času, pak se může stát, že se dialogové okno otevře, až když je ve skriptu vykonána třetí operace. To má za následek, že všechny další kroky skriptu jsou nefunkční. K takovéto situaci nesmí dojít, a proto je nutné přidělit velkou čekací dobu pro každou operaci v GUI. Kvůli tomu je takovýto program velice pomalý a přesto nespolehlivý. Za druhé je takovýto program závislý na pozici klíčových prvků. Stane-li se, že uživatel posune některé okno jinam, než tomu bylo u programování, pak program nefunguje. A s tím se pojí i velmi špatná přenositelnost programu na jiné platformy. Je-li program spuštěn na monitoru s jiným rozlišením, než pro které byl napsán, pak nebude fungovat.

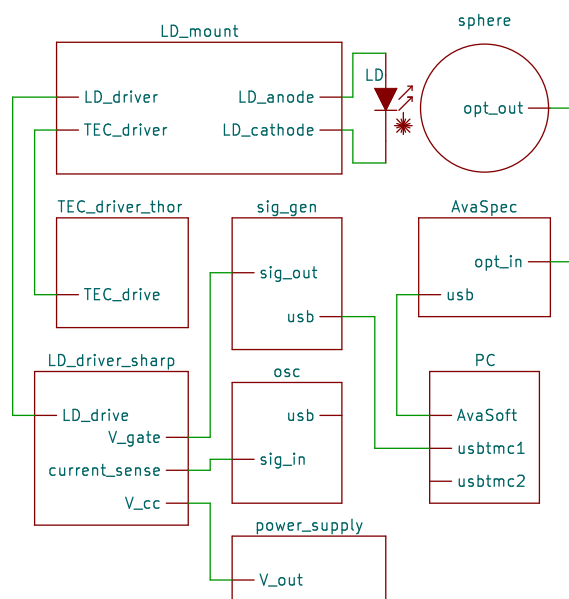
Dalším cílem experimentů mělo být také naměření optických průběhů při spínání o různých kmitočtech. Automatizace tohoto měření nebyla tak nutná, jako u výše zmíněných, nicméně v zájmu dobré opakovatelnosti, byla také provedena. Situace byla podstatně jednodušší, jelikož pro snímání dat byl zaměstnán osciloskop. Realizace skriptu vypadala obdobně, jako při měření se spektrometrem, nebylo ovšem nutné programovat GUI, jelikož osciloskop disponuje programovatelným rozhraním. Blokové schémata zapojení různých měření jsou zobrazena na obrázcích 1.9, 1.10, 1.11 a 1.12. Stavebními bloky v těchto schématech jsou: počítač (PC), spektrometr (AvaSpec), pasivní integrační koule (sphere), osciloskop (osc), generátor napěťových signálů (gen), LD driver a teplotní stabilizace (LD_driver_thor), dedikovaný spínač (LD_driver_sharp), laboratorní zdroj (power_supply), fotodetektor (fotodetektor) a LD stojan (LD_mount). Funkce bloků jsou vysvětleny v podkapitole 1.3. Detaily průběhu měření pro dílčí experimenty jsou popsány v sekci 2.1.1.



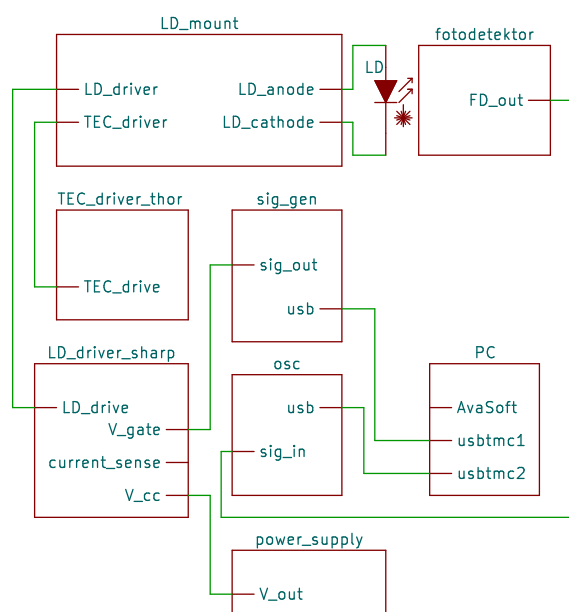
Obr. 1.9: Blokové schéma zapojení měření se spektrometrem v CW režimu, a PWM režimu s pomalými hranami.



Obr. 1.10: Blokové schéma zapojení měření s fotodetektorem v PWM režimu s pomalými hranami.



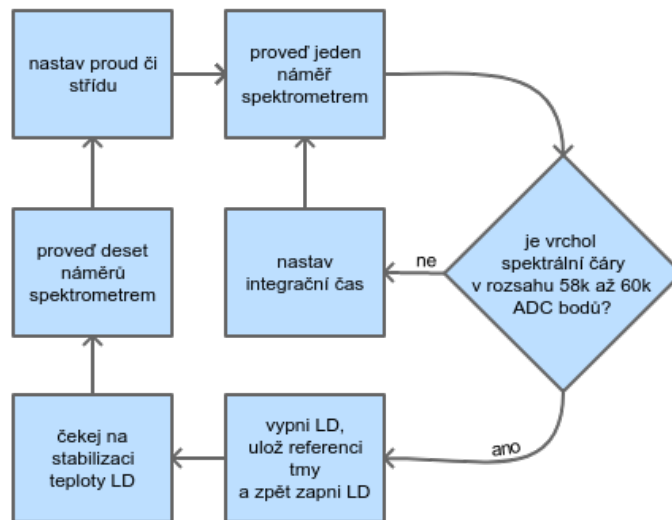
Obr. 1.11: Blokové schéma zapojení měření se spektrometrem v PWM režimu s rychlými hranami.



Obr. 1.12: Blokové schéma zapojení měření s fotodetektorem v PWM režimu s rychlými hranami.

Algoritmus měření se spektrometrem je zobrazen na obrázku 1.13. Program začíná nastavením úvodního proudu resp. střídý. Dále pokračuje provedením kontrolního náměru. Program pomocí něj zjišťuje, jestli měřené záření optimálně saturuje CCD. Tzn. jestli má snímek optimální dobu expozice. Pro tento úkol slouží interní funkce programu Avasoft "auto configure". Nicméně při měření se ukázalo, že v některých případech je automaticky nastavený integrační příliš krátký, což velmi nepříznivě ovlivňovalo linearitu naměřených charakteristik. Kalibrace integračního času probíhala v režii měřícího skriptu. Po kalibraci program vypíná LD aby mohl naměřit referenční hodnotu tmy. Jelikož byla integrační koule přiložena přímo na stojan s LD, měřená hodnota tmy byla vždy téměř nulová. Nicméně tento krok našel své uplatnění zejména při měření záření spontánní emise. Následně, po opětovném zapnutí LD, skript čeká na ustálení teploty LD. Čas čekání byl závislý na procházejícím proudu LD a po překročení prahového proudu dosahoval až třech minut. Po ustálení teploty program provádí deset zprůměrovaných náměrů a po nich nastavuje novou inkrementovanou hodnotu proudu resp. střídý LD. Program končí po odměření maximálního proudu popř. střídý.

Algoritmus měření s fotodetektorem je výrazně jednodušší. Pouze nastavuje kmitočet PWM, potom čeká na ustálení teploty LD, a nakonec stahuje data snímku z osciloskopu. Kódy scriptů jsou obsaženy v elektronické příloze této práce.



Obr. 1.13: Algoritmus měření se spektrometrem.

2 Výsledky studentské práce

Tato kapitola se věnuje úpravě, zobrazení a interpretaci naměřených dat.

V první podkapitole jsou definovány způsoby přepočtu naměřených surových dat a jejich přesnost. Přepočtem surových dat se zabývají sekce "Korekční křivka vstupu a výstupu ICT 510" a "Zkreslení optického průběhu při spínání PWM" a přesností naměřených výsledků sekce "Nejistoty měření".

Zbylé tři podkapitoly se věnují zobrazení a interpretaci naměřených a přepočítaných dat pro dílčí způsoby řízení LD: "CW režim", "PWM režim s pomalými hranami" a "PWM režim s rychlými hranami".

2.1 Obecné problémy měření

V této podkapitole je objasněn způsob řešení problémů spojených s měřeními experimenty. Těmito problémy jsou nelinearita analogových vstupů a výstupů LD driveru Thorlabs ICT 510, nejistoty měření a způsob určení zkreslení průběhu optického výstupu. Každému z těchto problémů je věnována sekce popisující jeho řešení aplikované v této práci.

2.1.1 Korekční křivka vstupu a výstupu ICT 510

Měření proudu LD probíhalo pro každý experiment jiným způsobem. Nicméně všechna přepočítaná data byla vztažena pomocí korekční křivky na hodnotu proudu, kterou by zobrazoval LD driver ICT 510 na svém displeji.

- V CW režimu byl proud LD nastavován pomocí napětí generátoru přivedeného na vstup "MOD IN" LD driveru. Toto napětí bylo zaznamenáno přes usb a přepočítáno pomocí korekční křivky na proud, který zobrazoval LD driver.

- V PWM režimu s pomalými hranami byl proud v aktivní úrovni PWM nastaven před započítáním měření. Ustálené napětí z generátoru bylo přivedeno na vstup "MOD IN" LD driveru, a nastaveno na takovou hodnotu, aby osciloskop měřil na výstupu "ANALOG OUT" LD driveru napětí odpovídající požadovanému maximálnímu proudu (150 mA resp. 220 mA), který byl dále přepočítán pomocí korekční křivky na hodnotu, kterou by zobrazoval LD driver.

- V PWM režimu s rychlými hranami byl proud v aktivní úrovni PWM také nastaven před započítáním měření. Na hradle spínače bylo nastaveno napětí zajišťující plnou saturaci vodivého kanálu. Následně bylo nastaveno napájecí napětí spínače na takovou hodnotu, aby osciloskop měřil na výstupu "CURRENT SENSE" LD spínače

napětí odpovídající požadovanému maximálnímu proudu (150 mA resp. 220 mA) a ten byl dále přepočítán pomocí korekční křivky na hodnotu, kterou by zobrazoval LD driver.

Poměr napětí ku proudu je pro oba porty LD driveru 10:1 $D_{io} = 10 \text{ VA}^{-1}$.

Tab. 2.1: Korekční křivky. Naměřené hodnoty proudu zobrazeného na LD driveru I_{dr} , napětí generátoru na "MOD IN" LD driveru U_{gen} a napětí z "ANALOG OUT" LD driveru U_{osc} . A relativní korekce proudu pro generátor K_{gen} a osciloskop K_{osc} .

I_{dr} [mA]	U_{gen} [V]	U_{osc} [V]	K_{gen} [%]	K_{osc} [%]
9,7	0,1	0,100	-3,093	-3,093
19,9	0,2	0,205	-0,503	-3,015
40,3	0,4	0,417	0,744	-3,474
60,7	0,6	0,622	1,153	-2,471
81,0	0,8	0,833	1,235	-2,840
101,4	1,0	1,040	1,381	-2,564
121,8	1,2	1,220	1,478	-0,164
142,2	1,4	1,440	1,547	-1,266
162,6	1,6	1,650	1,599	-1,476
183,0	1,8	1,850	1,639	-1,093
203,4	2,0	2,070	1,672	-1,770
224,1	2,2	2,280	1,830	-1,740
244,5	2,4	2,490	1,840	-1,840
254,7	2,5	2,590	1,845	-1,688

Pro výpočet pravé hodnoty proudu LD z hodnoty napětí na "MOD IN" platí tato rovnice:

$$I_{dr} = \frac{U_{gen}}{D_{io}} + \left(\frac{U_{gen}}{D_{io}} \cdot \frac{K_{gen}(U_{gen})}{100} \right) \text{ [mA]} \quad (2.1)$$

Pro výpočet pravé hodnoty proudu LD z hodnoty napětí na "MOD OUT" platí tato rovnice:

$$I_{dr} = \frac{U_{osc}}{D_{io}} + \left(\frac{U_{osc}}{D_{io}} \cdot \frac{K_{osc}(U_{osc})}{100} \right) \text{ [mA]} \quad (2.2)$$

2.1.2 Nejistoty měření

Existují dva základní typy nejistot. *Nejistota typu A*, u_A (dále NTA), která se určuje experimentálně opakovaným měřením. Je to výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru $s_{\bar{x}}$, kde x je opakovaně měřená veličina, \bar{x} je aritmetický průměr měřené veličiny a n je počet měření.

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

Nejistota typu B, u_B (dále NTB), která je určována jinak než opakovaným měřením a může být dána specifikací měřících přístrojů. V takovém případě je NTB je rovna:

$$u_B = \frac{u_{instr}}{\chi} \quad (2.4)$$

Kde u_{instr} je hodnota získaná z katalogového listu a χ je koeficient rozdělení náhodné veličiny. Pro všechny výpočty byl použit koeficient *normálního rozdělení* $\chi = 2$.

Celková NTB je určena geometrickým součtem všech zdrojů NTB:

$$u_B = \sqrt{\sum_{Z=1}^n u_{BZ}^2} \quad (2.5)$$

Dále se ještě určuje *kombinovaná standardní nejistota*, u_C (dále NTC), která je geometrickým součtem NTA a NTB:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (2.6)$$

Pravděpodobnost, že skutečná hodnota měřené náhodné veličiny leží v intervalu udaném kombinovanou standardní nejistotou u_C , je pro normální rozložení 68%.

Nakonec ještě *rozšířená nejistota*, u_R s koeficientem rozšíření k_r . Pro všechny výpočty byl použit $k_r = 2$ pro *normální rozdělení*, což znamená, že měřená hodnota se nachází v rozmezí udaném u_R s 95% pravděpodobností.

$$u_R = k_r \cdot u_C \quad (2.7)$$

Z toho vyplývá, že pokud nejistotu udává pouze přesnost jednoho přístroje, pak je *rozšířená nejistota* rovna:

$$u_R = 2 \cdot u_B = 2 \cdot \frac{u_{instr}}{2} = u_{instr} \quad (2.8)$$

Nejistota teploty LD

Nejistota teploty LD se projevila jak v měřeních se spektrometrem, tak v měřeních s fotodetektorem. Na nejistotě teploty LD se podílel pouze TEC driver. Přesnost

použitého teplotního senzoru AD590 je $u_{tec} = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ [18]. Nejistota teploty LD je podle vzorce 2.8 $u_{R_TEC} = \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Horizontální nejistota při měření s fotodetektozem

Při měření s fotodetektozem byla určena pouze NTB. Tzn. $u_C = u_B$. Podílely se na ní dva faktory: nejistota fotodetektoru a osciloskopu.

Na horizontální nejistotě se podílel pouze osciloskop, který má horizontální přesnost $u_{osc_hor} = \pm 50 \text{ ppm} = \pm 0,005 \text{ } \%$ [29]. Ta je vztažena k hodnotě použité časové základny. Horizontální nejistota je tedy podle vzorce 2.8 $u_{R_f_hor} = \pm 0,005 \text{ } \%$.

Vertikální nejistota při měření s fotodetektozem

Na vertikální nejistotě se podílel jak fotodetektor tak i osciloskop. Vertikální přesnost fotodetektoru je $u_{f_vert} = \pm 2 \text{ } \%$ [27], z toho NTB podle vzorce 2.4 $u_{B1_f_ver} = \pm 2/2 = \pm 1 \text{ } \%$. Vertikální přesnost osciloskopu je $u_{osc_vert} = \pm 3 \text{ } \%$ [29], z toho NTB podle vzorce 2.4 $u_{B2_f_ver} = \pm 3/2 = \pm 1,5 \text{ } \%$. Celková vertikální NTB dat fotodetektoru je podle vzorce 2.5 $u_{B_f_ver} = \sqrt{1^2 + 1,5^2} = \pm 1,8 \text{ } \%$. A nakonec $u_{R_f_vert} = 2 \cdot \pm 1,8 = \pm 3,6 \text{ } \%$.

Nejistota proudu LD při měření se spektrometrem

Proud LD byl přepočítáván podle korekční křivky ICT 510. Ta je blíže popsána v subsekcí 2.1.1. Díky této korekci byla vyřazena z výpočtů poměrně vysoká nepřesnost portů ICT 510. Pro proud LD byla počítána pouze NTB ($u_C = u_B$). Ta se lišila podle zapojení experimentu a byla rozdělena na NTB v CW režimu $u_{B_s_i_cw}$ a v PWM režimu $u_{B_s_imax_pwm}$. V CW režimu se na NTB proudu LD podílí pouze nepřesnost proudového výstupu LD driveru $u_{driv_i} = \pm 1 \text{ mA}$ [18]. Nejistota proudu v CW režimu je podle vzorce 2.8 $u_{R_s_i_cw} = \pm 1 \text{ mA}$. V PWM režimech se na NTB proudu LD podílí jak $u_{driv_i} = \pm 1 \text{ mA}$ [18], tak i nepřesnost osciloskopu $u_{osc_vert} = \pm 3 \text{ } \%$ [29]. NTB proudu LD v PWM režimu $u_{B_s_i_pwm}$ je třeba vyjádřit jen pro maximální proudy. Zvlášť pro zelenou LD **PLT5 520B** $u_{B_s_imax_pwm_gr}$ a zvlášť pro modrou LD **PLT5 450B** $u_{B_s_imax_pwm_bl}$. Maximální proudy **PLT5 520B** a **PLT5 450B** byli podle vzorce 2.2:

$$\begin{aligned} I_{max_pwm_gr} &= \frac{2,2}{10} + \left(\frac{2,2}{10} \cdot \frac{-1,77}{100} \right) \doteq 216,1 \text{ mA} \\ I_{max_pwm_bl} &= \frac{1,5}{10} + \left(\frac{1,5}{10} \cdot \frac{-1,476}{100} \right) \doteq 147,8 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Z toho potom podle vzorců 2.4, 2.5 a 2.7:

$$\begin{aligned}
u_{B_s_imax_pwm_gr} &= \sqrt{\left[\frac{u_{driv_ild}}{\chi}\right]^2 + \left[\frac{u_{osc_vert}}{\chi}\right]^2} \\
&= \sqrt{\left[\frac{\pm 1m}{2}\right]^2 + \left[\frac{\frac{216,1m}{100} \cdot (\pm 3)}{2}\right]^2} \\
&\doteq \pm 3,2798 \text{ mA} \\
u_{R_s_imax_pwm_gr} &= 2 \cdot (\pm 3,2798m) \doteq \pm 6,6 \text{ mA} \\
u_{B_s_imax_pwm_bl} &= \sqrt{\left[\frac{\pm 1m}{2}\right]^2 + \left[\frac{\frac{148,1m}{100} \cdot (\pm 3)}{2}\right]^2} \\
&\doteq \pm 2,2771 \text{ mA} \\
u_{R_s_imax_pwm_bl} &= 2 \cdot (\pm 2,2771m) \doteq \pm 4,6 \text{ mA}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Nejistota optického výkonu při měření se spektrometrem

Pro každou iteraci proudu bylo provedeno 100 měření se spektrometrem. Bylo však k dispozici pouze 10 hodnot, ze kterých bylo možné vypočítat NTA podle vzorce 2.3. Při každém měření spektrometrem bylo využito interní funkce SM a programu Avasoft pro několikanásobné měření a průměrování naměřených hodnot. Tato funkce nabízí možnost nastavit si počet náměrů, který se provede po stisknutí ikony startu měření v GUI. Uživateli je tedy po konci měření předán aritmetický průměr takového počtu náměrů, jaký si uživatel zvolil. Ve všech experimentech v této práci byl tento počet zvolen na 10.

Ve výsledku byly přepočítané hodnoty P_{opt} a CWL počítány z deseti hodnot naměřených skriptem, které jsou dostupné v surových datech, a ze kterých byla počítána NTA. Každá z nich byla výsledkem deseti náměrů průměrovaných v rozhraní Avasoft. Použití této funkce mělo pro měřené experimenty dva hlavní důsledky. Zaprvé se zkrátila doba přesných náměrů. Tím je myšleno, že pokud by bylo průměrováno 100 náměrů pouze pomocí měřícího skriptu, pak by doba měření dramaticky vzrostla v důsledku pomalých mechanismů automatizace GUI. Zadruhé je nutno počítat s tím, že NTA je vztažena k měření deseti zprůměrovaných hodnot. Rozptyl a tedy i NTA je nižší než při měření bez využití interního průměrování programu Avasoft. Nepřesnost optického výkonu podle kalibračního listu SM $u_{spec_popt} = \pm 3,5 \%$. Po spočítání NTA a NTB se ukázalo, že $u_{A_s_popt}$ je o dva řády menší, než $u_{B_s_popt}$, pro všechna měření. Proto byla nejistota průměru deseti měřených hodnot optického výkonu určena podle vzorce 2.8 jako $u_{R_s_popt} = \pm 3,5 \%$.

Nejistota CWL při měření se spektrometrem

Hodnoty CWL byly součástí stejného souboru dat jako hodnoty optického výkonu. Tzn., že byly získány stejným způsobem. Stejně tak byla podle rovnice 2.3 počítána i NTA. Nepřesnost CWL byla vypočítána pomocí rovnice 2.11, kde hodnota $FWHM$ byla získána z KL. Pro použitý SM, který má mřížku 500 linek/mm a štěrbinu $50 \mu\text{m}$ je podle KL $FWHM = 5,5 \text{ nm}$.

$$\begin{aligned} u_{spec_cwl} &= \frac{1}{2} \cdot FWHM \\ &= \frac{1}{2} \cdot 5,5 \text{ nm} \\ &= 2,75 \text{ nm} \end{aligned} \tag{2.11}$$

Po spočítání NTA a NTB se znova ukázalo, že $u_{A_s_cwl} \ll u_{B_s_cwl}$. Proto byla nejistota průměru deseti měřených hodnot CWL určena podle vzorce 2.8 jako $u_{R_s_cwl} = \pm 2,75 \text{ nm}$.

Neurčené nejistoty

V této práci nebyla určena nejistota zkreslení optického průběhu vůči ideálnímu průběhu při řízení s PWM ΔP_{opt} , nejistota prahového proudu I_{th} , ani nejistota prahové střídy w_{th} . Jelikož jde o nepřímá měření počítaná z mnoha dat, je jejich určení poměrně složité a spadá mimo priority této práce.

Celkový přehled nejistot

Přehled nejistot měření zobrazen v tabulce 2.2:

Tab. 2.2: Přehled nejistot měření.

popis nejistoty	znak nejistoty	hodnota nejistoty
nejistota teploty LD	u_{R_TEC}	$\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
horizontální nejistota měření s FD.	$u_{R_f_hor}$	$\pm 0,005 \%$
vertikální nejistota měření s FD.	$u_{R_f_ver}$	$\pm 3,6 \%$
nejistota proudu v CW režimu při měření s SM.	$u_{R_s_i_cw}$	$\pm 1 \text{ mA}$
nejistota maximálního proudu v PWM režimu pro PLT5 520B při měření se SM	$u_{R_s_imax_pwm_gr}$	$\pm 6,6 \text{ mA}$
nejistota maximálního proudu v PWM režimu pro PLT5 450B při měření se SM	$u_{R_s_imax_pwm_bl}$	$\pm 4,6 \text{ mA}$
nejistota průměrovaného optického výkonu	$u_{R_s_popt}$	$\pm 3,5 \%$
nejistota průměrované centrální vlnové délky	$u_{R_s_cwl}$	$\pm 2,75 \text{ nm}$

2.1.3 Zkreslení optického průběhu při spínání PWM

Jelikož v reálném světě při spínání s PWM nelze dosáhnout ideálního průběhu (pravoúhlých hran pulzů) optického výkonu v čase, přijde vhod mít způsob, kterým lze toto zkreslení kvantifikovat. V této práci byl použit následující způsob. Každý naměřený bod charakteristiky optického průběhu v čase pro jeden kmitočet $P_{opt_r}(t)$ byl porovnán s hodnotou, kterou by měl v daný okamžik průběh ideální $P_{opt_i}(t)$. Z tohoto rozdílu za pomoci referenční hodnoty P_{ref} , která odpovídá hodnotě v aktivní úrovni, bylo vypočítáno relativní zkreslení pro jeden naměřený bod v čase. Celkové zkreslení průběhu pro jeden kmitočet byl nakonec vyjádřen jako aritmetický průměr všech parciálních zkreslení v čase jedné periody viz 2.12. Tento přístup bylo možné aplikovat díky tomu, že data snímků pořízených z osciloskopu jsou synchronizována na vstupní spínací napětí.

Byly určeny čtyři hodnoty P_{ref} . To pro každou kombinaci LD a zapojení PWM řízení. To bylo nutné, jelikož při změně LD nebo způsobu řízení PWM bylo třeba znovu optimálně nastavit polohu fotodetektoru a LD. A jelikož byl fotodetektor velice citlivý na toto nastavení, každá takováto změna vyžadovala novou hodnotu referenčního relativního optického výkonu v aktivní a pasivní úrovni.

Určení referenčních bodů probíhalo následovně. Byl vybrán jeden kmitočet s nejméně zkresleným průběhem. Z něj bylo na konci pasivní i aktivní úrovně vybráno pár bodů. A jejich aritmetický průměr nakonec určil referenční hodnotu v aktivní $P_{ref_{akt}}$ či pasivní části spínání $P_{ref_{pas}}$. A jejich absolutní hodnota rozdílu nakonec určila referenční hodnotu zkreslení $P_{ref} = |P_{ref_{akt}} - P_{ref_{pas}}|$.

Funkce $P_{opt_i}(t)$ má průběh ideálního PWM se střídou 50 %, kmitočtem odpovídajícím porovnávanému reálnému průběhu, pasivní úrovní v hodnotě $P_{ref_{pas}}$ a aktivní úrovní v hodnotě $P_{ref_{akt}}$.

$$\Delta P_{opt} = \frac{\sum \left[\frac{\sqrt{(P_{opt_r}(t) - P_{opt_i}(t))^2}}{P_{ref}} \cdot 100 \right]}{n} [\%] \quad (2.12)$$

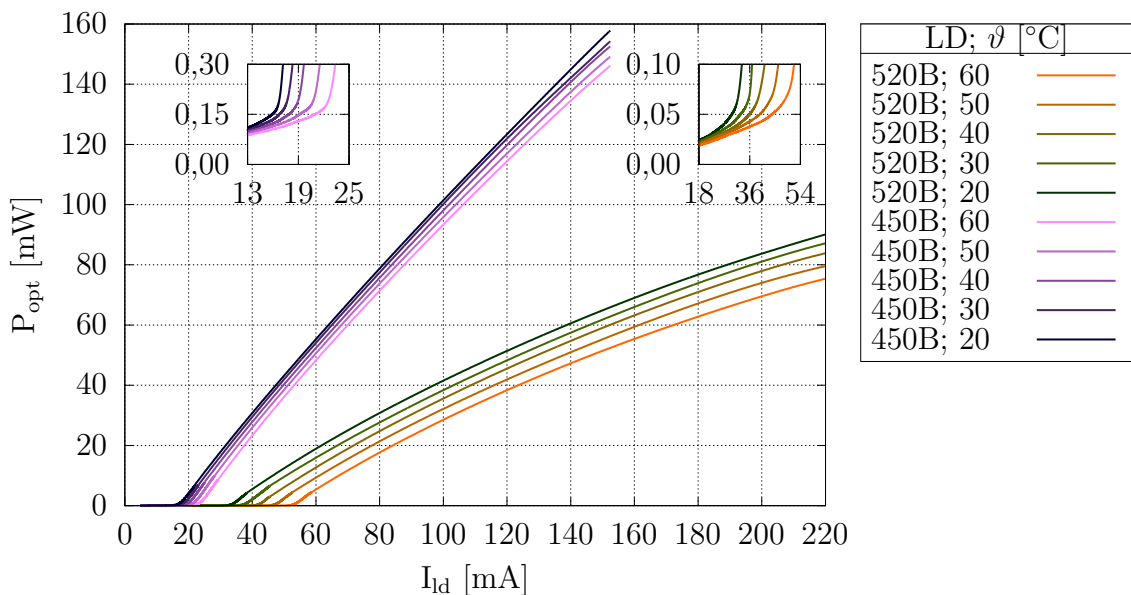
2.2 Experiment I. CW režim

Tato podkapitola se zabývá zobrazením naměřených dat ve formě grafů, popisem jevů, které v nich lze pozorovat a jejich případným vysvětlením. Pro CW režim byla realizována pouze měření se spektrometrem zapojená podle blokového schématu 1.9. Měření s fotodetektozem nebyla třeba, jelikož se jednalo o ustálené průběhy optického výstupu.

Naměřené výkonové char. v CW režimu korespondují s údaji v KL. Naměřená výkonová char. **PLT5 450B** (viz 2.1) je lineární od prahového proudu, až do konce měřeného rozsahu. Lineární charakter od prahového proudu vykazuje i char. uvedená v KL (viz 1.4). V KL pro $I_{ld} = 100 \text{ mA}$ a $\vartheta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá $P_{opt} \approx 110 \text{ mW}$. V naměřené char. je pro $I_{ld} = 100 \text{ mA}$ a $\vartheta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{opt} \approx 100 \text{ mW}$.

Naměřená výkonová char. **PLT5 520B** (viz 2.1) od prahového proudu není lineární. Stejně zakřivení vykazuje i char. uvedená v KL (viz 1.4). V KL je pro $I_{ld} = 200 \text{ mA}$ a $\vartheta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{opt} \approx 90 \text{ mW}$. V naměřené char. pro $I_{ld} = 200 \text{ mA}$ a $\vartheta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá $P_{opt} \approx 80 \text{ mW}$.

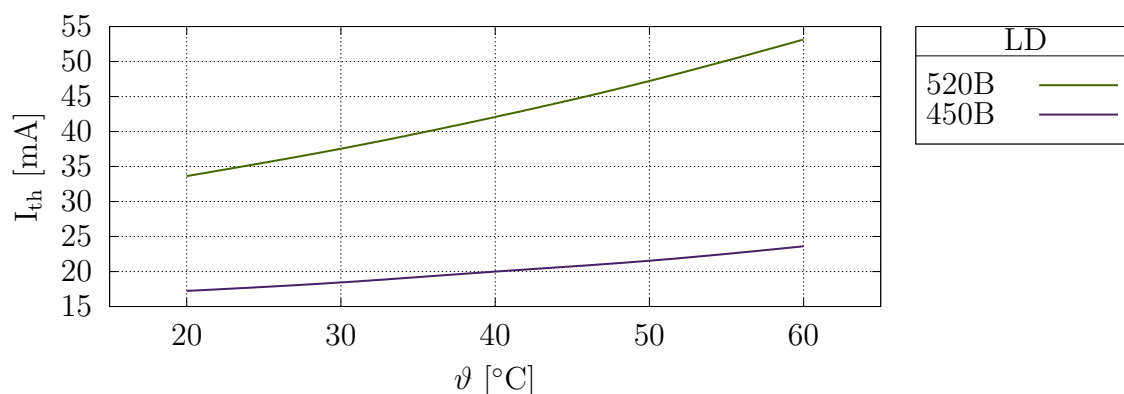
Rozdíly optického výkonu mezi naměřenými výsledky a KL mohou být způsobeny výrobní tolerancí nebo poklesem účinnosti v průběhu životního cyklu LD. U obou LD byl zaznamenán pokles výkonu LD s její rostoucí teplotou.



Obr. 2.1: Výkonová charakteristika obou LD v CW režimu s různými teplotami.

Z výkonových charakteristik jsou zpracovány charakteristiky prahového proudu I_{th} LD (viz 2.2). U obou LD vzkazuje tato závislost exponenciální růst I_{th} s růstem ϑ . V měřeném rozsahu teplot LD se I_{th} pohybuje od 17,2 mA do 23,6 mA

pro **PLT5 450B**. A od 33,6 mA do 53,1 mA pro **PLT5 520B**.

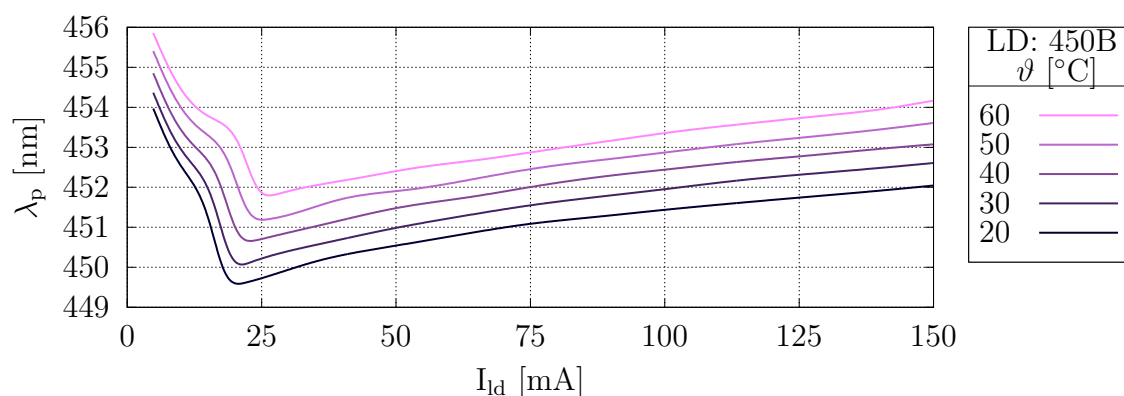


Obr. 2.2: Závislost prahového proudu obou LD na jejich teplotě v CW režimu.

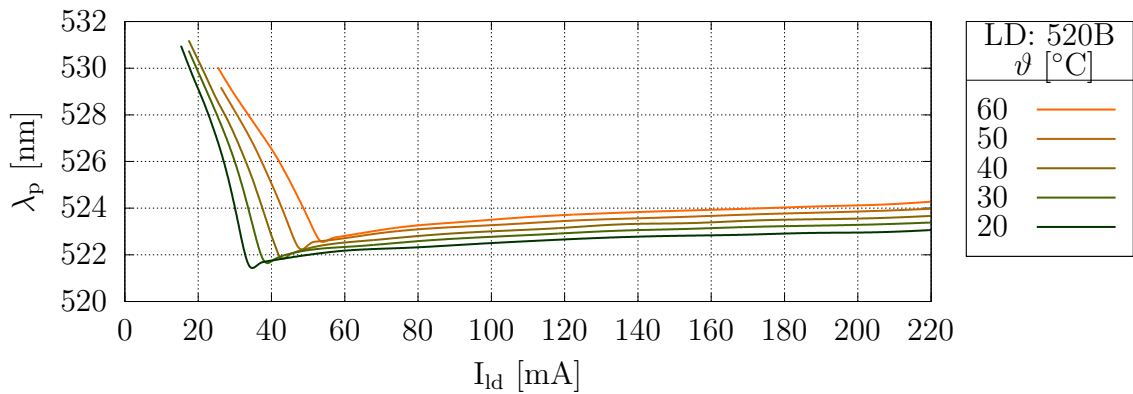
Charakteristiky centrální vlnové délky λ_p [nm] (neboli vlnové délky v peaku spektrální čáry) obou LD (viz 2.3, 2.4) vykazují pokles CWL s rostoucím proudem v oblasti spontánní emise. A růst CWL s rostoucím proudem v oblasti stimulované emise. U obou LD je zaznamenán růst CWL s rostoucí teplotou LD.

Pro **PLT5 450B** a její teplotu $\vartheta = 20$ °C se v měřené oblasti spontánní emise pohybuje CWL v rozmezí 449,6 nm – 452,1 nm. Pro stejnou LD, $I_{ld} = 152,4$ mA a 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C, se CWL pohybuje v rozmezí 452,1 nm – 454,2 nm.

Pro **PLT5 520B** a její teplotu $\vartheta = 20$ °C se v měřené oblasti spontánní emise pohybuje CWL v rozmezí 521,3 nm – 523,1 nm. Pro stejnou LD, $I_{ld} = 224,0$ mA a 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C, se CWL pohybuje v rozmezí 523,1 nm – 524,3 nm.



Obr. 2.3: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 450B** v CW režimu s různými teplotami.



Obr. 2.4: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 520B** v CW režimu s různými teplotami.

Naměřené výsledky jsou zhrnuty v tabulce 2.3.

Tab. 2.3: Výčet naměřených výsledků CW režimu.

PLT5 450B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
P_{opt} [mW], pro ($I_{ld} = 152,4$ mA; 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	157,8 - 146,1	11,7
I_{th} [mA], pro (20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	17,2 - 23,6	6,4
λ_p [nm], pro ($I_{th} \leq I_{ld} \leq 152,4$ mA; $\vartheta = 20$ °C)	449,6 - 452,1	2,5
λ_p [nm], pro ($I_{ld} = 152,4$ mA; 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	452,1 - 454,2	2,1
PLT5 520B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
P_{opt} [mW], pro ($I_{ld} = 224,0$ mA; 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	91,4 - 76,3	15,1
I_{th} [mA], pro (20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	33,6 - 53,1	19,5
λ_p [nm], pro ($I_{th} \leq I_{ld} \leq 224$ mA; $\vartheta = 20$ °C)	521,3 - 523,1	1,8
λ_p [nm], pro ($I_{ld} = 224,0$ mA; 20 °C $\leq \vartheta \leq 60$ °C)	523,1 - 524,3	2,2

2.3 Experiment II. PWM režim s pomalými hranami

Tato podkapitola se zabývá zobrazením naměřených dat ve formě grafů, popisem jevů, které v nich lze pozorovat a jejich případným vysvětlením. Pro PWM režim s pomalými hranami byla realizována jak měření se spektrometrem zapojená podle blokového schématu 1.9, tak měření s fotodetektozem zapojená podle blokového schématu 1.10. Zde bylo měření s fotodetektozem žádoucí. A to za účelem porovnat průběhy spínání s naměřenými charakteristikami.

Před započítím měření byl nastaven proud v aktivní úrovni podle postupu uvedeného v podkapitole 2.1.1. Pro **PLT5 450B** tedy platilo $U_{osc} = 1,5 V$ a podle rovnice 2.9 byl proud v aktivní úrovni $I_{max_pwm_bl} = I_{dr} = 147,8 mA$. Stejný postup byl použit i pro určení proudu v aktivní úrovni při spínání s **PLT5 520B**: $I_{max_pwm_gr} = I_{dr} = 216,2 mA$.

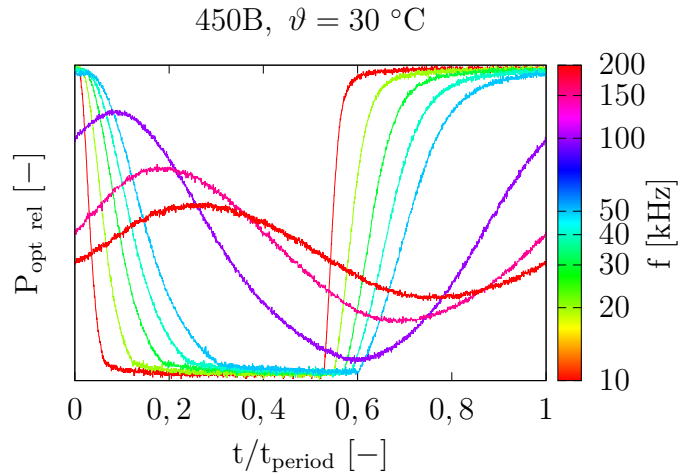
2.3.1 Měření s fotodetektozem

Účelem měření s fotodetektozem bylo ilustrovat průběhy optického výkonu v čase, pro různé kmitočty PWM. Takové výsledky ukazují, jak moc se liší reálný optický průběh od ideálního. Na jejich základě se dá určit doba hran pulzů. Toto měření bylo zapojeno podle blokového schématu 1.10.

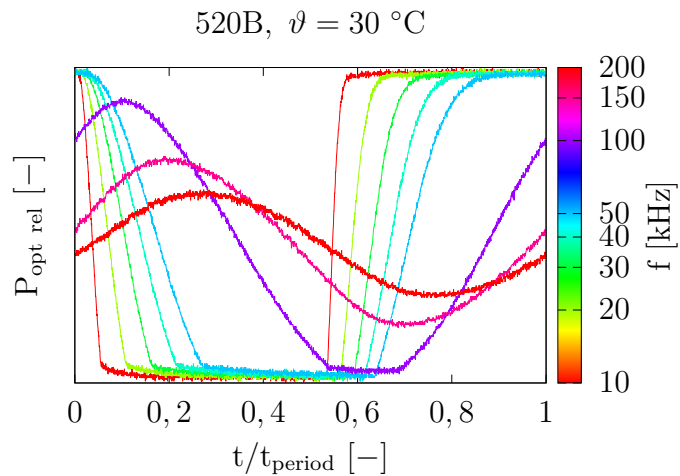
Rozlišení osciloskopu bylo 2500 samplů na snímek. Některé měřené průběhy periody jsou zobrazeny přesně z tolika samplů, a jiné z méně. To je způsobeno tím, že některé doby horizontálního rozlišení nebyly celočíselně dělitelné dobou periody některých použitých kmitočtů. Tzn. některé periody se vměstnaly přímo na celou délku snímku a některé ne. Počet samplů na jednu periodu v grafu nicméně neklesl pod 1500.

Jedna perioda optického výstupu LD pro různé kmitočty PWM se střídou 50 % je zobrazena v grafech 2.5 a 2.6. Na těchto grafech lze s rostoucím kmitočtem PWM pozorovat rostoucí zastoupení periody hranami pulzu. Od 100 kHz byla dokonce perioda tvořena pouze hranami pulzů, a průběh tak byl pilovitý až sinusový. Po dosažení sinusovitého průběhu byl s rostoucím kmitočtem PWM zaznamenán pokles jeho amplitudy. Lze pozorovat, že pokles amplitudy konvergoval k ustálené hladině. Bylo také zaznamenáno zpoždění fáze průběhu s rostoucím kmitočtem PWM.

V grafu 2.7, který zobrazuje zkresení tvaru pulzu v závislosti na kmitočtu PWM, lze pozorovat lineární nárůst a následný lineární pokles. Funkce dosahuje maxima v bodě cca 120 kHz, kdy má měřený průběh již posunutou fázi, ale jeho amplituda je stále velká. To v důsledku znamená, že aktivní část měřeného průběhu je v pasivní části ideálního průběhu a naopak. A jejich rozdíl podle vzorce 2.12 je tak vyšší,



Obr. 2.5: Relativní optický výkon **PLT5 450B** v čase jedné periody spínání s PWM (s pomalými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.

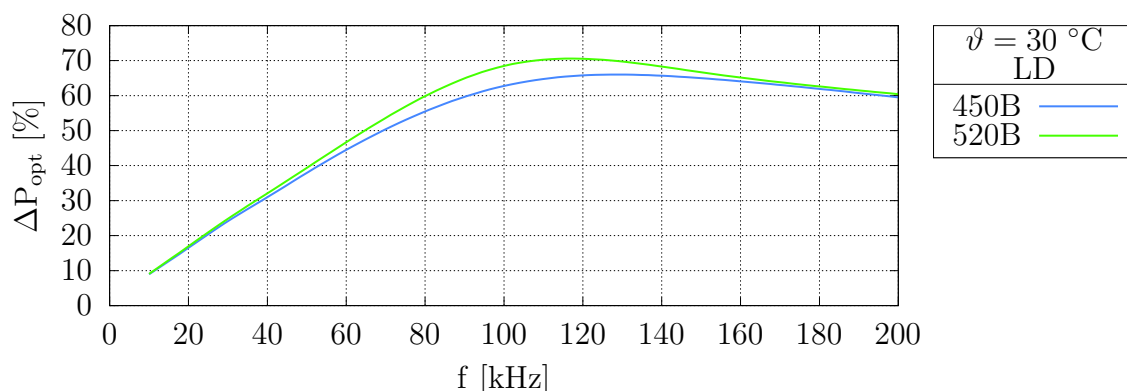


Obr. 2.6: Relativní optický výkon **PLT5 520B** v čase jedné periody spínání s PWM (s pomalými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.

než je tomu na vyšších kmitočtech, kdy je měřený průběh téměř ustálený na střední hladině. Zkreslení 100 % by tedy bylo možné dosáhnout posunutím optického výstupu o 180° .

Ze vzorce 2.12 vyplývá, že pokud naměřené optické průběhy konvergují k jakékoli ustálené hladině v intervalu P_{refpas} až P_{refakt} , pak by charakteristika jejich zkreslení měla konvergovat vždy k 50 %. To lze pozorovat i v grafu 2.7.

Spínání **PLT5 520B** vykazuje vyšší zkreslení jako spínání s **PLT5 450B**. To může být způsobeno vyšším proudem v aktivní úrovni pulzu. Lineární nárůst zkreslení může poukazovat na to, že průběh hran pulzů zůstává pro různé kmitočty spínání stejný.

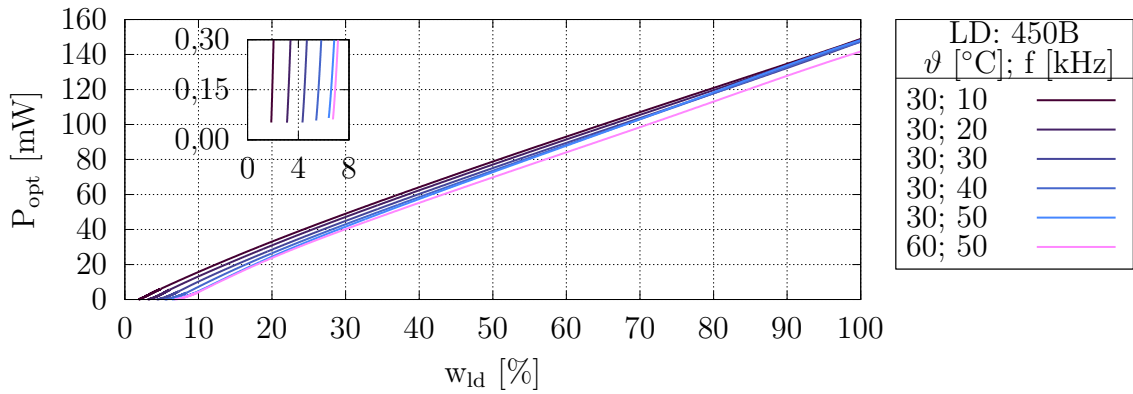


Obr. 2.7: Charakteristika zkreslení optického průběhu vůči kmitočtu PWM (s pomalými hranami) pro obě LD.

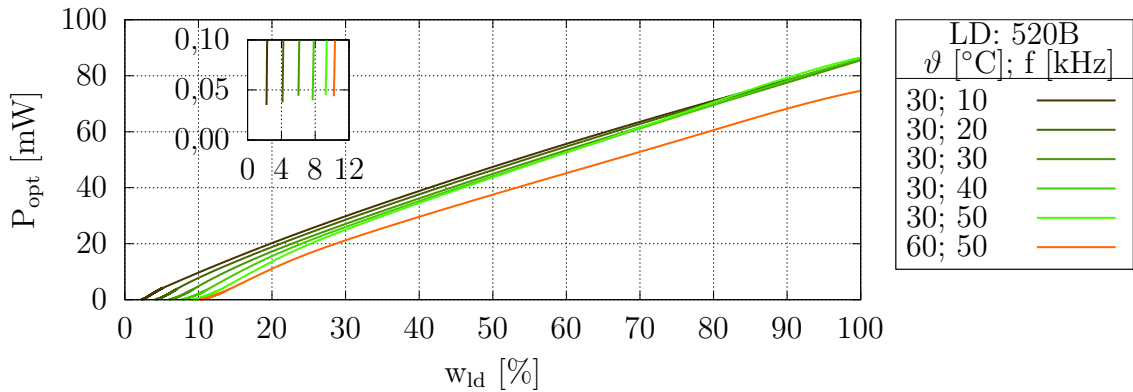
2.3.2 Měření se spektrometrem

Toto měření bylo zapojeno podle blokového schématu 1.9. U obou LD byly naměřeny téměř lineární výkonové charakteristiky zobrazené v grafech 2.8 a 2.9. Nelinearitu v těchto grafech tvoří dva prvky. Zaprvé nenulová prahová střída, která roste s rostoucím kmitočtem, jak je také zobrazeno v grafu 2.10. Ta se pohybuje od 1,93 % do 6,63 % pro **PLT5 450B** a $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. A od 2,32 % do 9,42 % pro **PLT5 520B** a $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zadruhé mírné zakřivení char. na jejím začátku a konci, které koresponduje s teorií popsanou v podkapitole 1.1.4. Zároveň byl naměřen i pokles optického výkonu s rostoucí teplotou LD, podobně jako v CW režimu. Rozdíl v tomto poklesu je oproti CW režimu takový, že jeho hodnota není konstantní v celé oblasti nad prahovým proudem. Pokles optického výkonu v důsledku rostoucí teploty byl závislý na střídě PWM. Závislost prahové střídy na kmitočtu (viz 2.10) byla pro obě LD při teplotě $\vartheta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ lineární. Zatímco při teplotě $\vartheta = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ lineární růst char. na vysokých kmitočtech stagnuje.

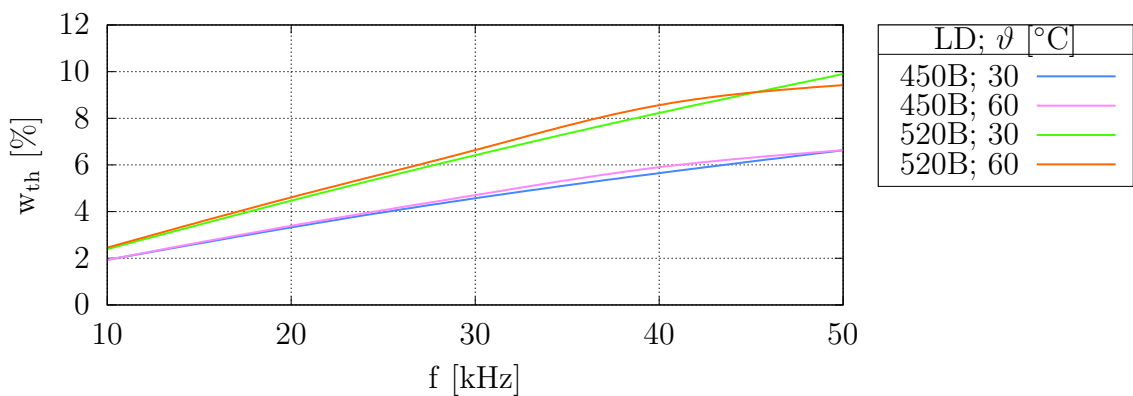
Charakteristiky CWL λ_p [m] obou LD (viz 2.11, 2.12) v oblasti nad prahovou střídou vykazují nejprve prudký nárůst a potom mírnější lineární růst. Z toho vyplývá, že lineární průběh char. λ_p , se nachází až za prahovou střídou. Pro kmitočty spínání 10 kHz je to od bodů $w_{th\lambda bl} = 4,87\text{ }%$ a $w_{th\lambda gr} = 3,24\text{ }%$. Stejně jako v CW režimu byl pozorován nárůst CWL s rostoucí teplotou, který byl v celé měřené oblasti konstantní.



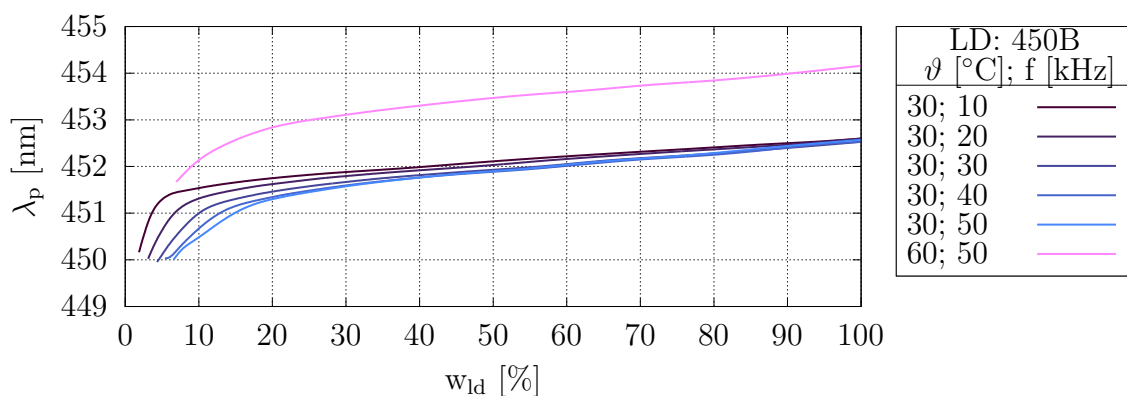
Obr. 2.8: Výkonová charakteristika **PLT5 450B** v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.



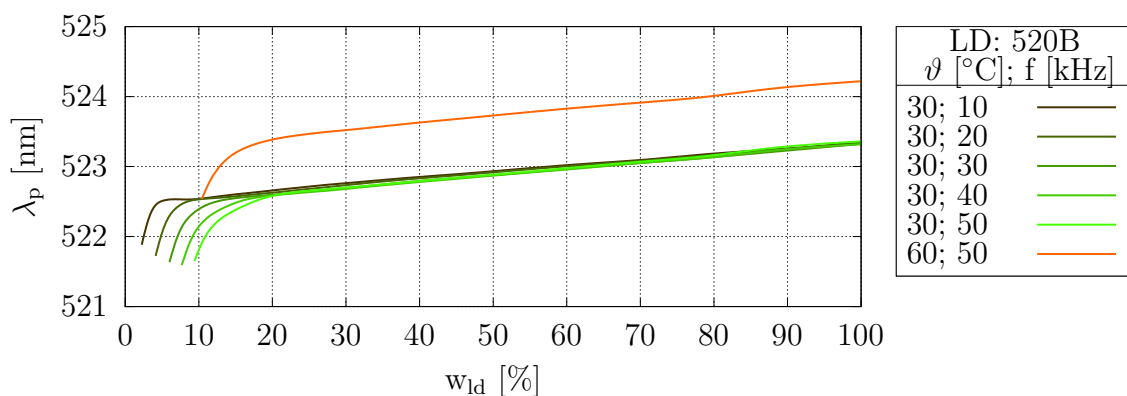
Obr. 2.9: Výkonová charakteristika **PLT5 520B** v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.



Obr. 2.10: Závislost prahové střídy obou LD na kmitočtu spínání v PWM režimu (s pomalými hranami) pro různé teploty.



Obr. 2.11: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 450B** v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.



Obr. 2.12: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 520B** v PWM režimu (s pomalými hranami) s různými kmitočty a teplotami.

Tab. 2.4: Výčet naměřených výsledků PWM režimu s pomalými hranami.

PLT5 450B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
w_{th} [%], <i>pro</i> ($10 \text{ kHz} \leq f \leq 50 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	1,93 - 6,63	4,7
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	450,0 - 452,6	2,6
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th_{\lambda bl}} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	451,5 - 452,6	1,1
PLT5 520B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
w_{th} [%], <i>pro</i> ($10 \text{ kHz} \leq f \leq 50 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	2,32 - 9,42	7,1
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	521,7 - 523,4	1,7
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th_{\lambda gr}} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	522,3 - 523,4	0,9

2.4 Experiment III. PWM režim s rychlými hranami

Tato podkapitola se zabývá zobrazením naměřených dat ve formě grafů, popisem jevů, které v nich lze pozorovat a jejich případným vysvětlením. Pro PWM režim s rychlými hranami byla realizována jak měření se spektrometrem zapojená podle blokového schématu 1.9, tak měření s fotodetektorem zapojená podle blokového schématu 1.10. Zde bylo měření s fotodetektorem žádoucí. A to za účelem porovnat průběhy spínání s naměřenými charakteristikami či s průběhy spínání s pomalými hranami.

Před započítím měření byl nastaven proud v aktivní úrovni podle postupu uvedeného v podkapitole 2.1.1. Pro **PLT5 450B** tedy platilo $U_{osc} = 1,5 V$ a podle rovnice 2.9 byl proud v aktivní úrovni $I_{max_pwm_bl} = I_{dr} = 147,8 mA$. Stejný postup byl použit i pro určení proudu v aktivní úrovni při spínání s **PLT5 520B**: $I_{max_pwm_gr} = I_{dr} = 216,2 mA$.

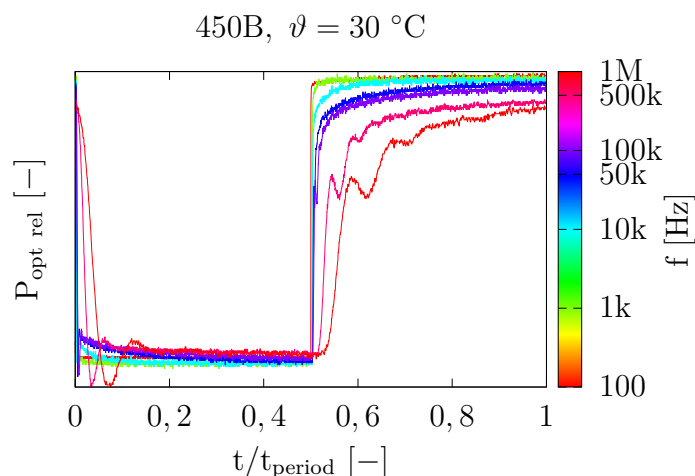
2.4.1 Měření s fotodetektorem

Toto měření bylo zapojeno podle blokového schématu 1.12. Jedna perioda optického výstupu LD pro různé kmitočty PWM se střídou 50 % je zobrazena v grafech 2.13 a 2.14. Oproti PWM režimu s pomalými hranami lze z optických průběhů pozorovat menší zkreslení. Např. na kmitočtu 100 kHz, při kterém spínání s komerčním driverem již vykazovalo sinusový průběh, byly průběhy s navrženým spínačem stále obdélníkové.

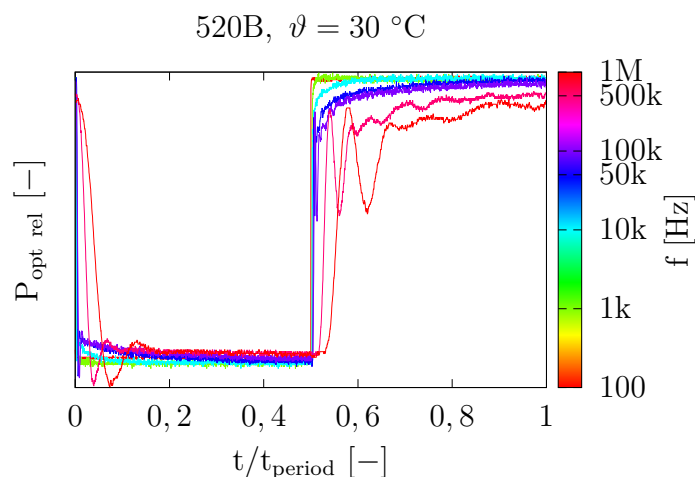
Dále bylo naměřeno, že hrany pulzů byly doprovázeny tlumenými zákmity. U vysokých kmitočtů byl zaznamenán zákmit po sestupné hraně pulzu, který zasahuje až pod úroveň pasivní hladiny. To by znamenalo, že v takové chvíli byl naměřen záporný optický výkon, což zřejmě neodpovídá realitě. Je známo, že obdélníkový signál je složen z mnoha harmonických. A také, že použitý fotodetektor má šířku pásma 12 MHz. Na základě těchto informací je možno pozorované zákmity dát částečně nebo celkově za vinu měřicímu přístroji, fotodetektoru.

A nakonec byl s rostoucím kmitočtem také pozorován pokles maximálního optického výkonu při aktivní hladině a nárůst při pasivní hladině.

V grafu 2.15, který zobrazuje zkreslení tvaru pulzu v závislosti na kmitočtu PWM, lze téměř v celém měřeném rozsahu (kromě prvních pár kHz) pozorovat lineární nárůst. Na rozdíl od PWM režimu s pomalými hranami bylo naměřeno vyšší zkreslení pro **PLT5 450B**. Lineární nárůst zkreslení může poukazovat na to, že průběh hran pulzů zůstává pro různé kmitočty spínání stejný a mění se pouze jeho poměr vůči ustáleným hladinám.



Obr. 2.13: Relativní optický výkon **PLT5 450B** v čase jedné periody spínání s PWM (s rychlými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.

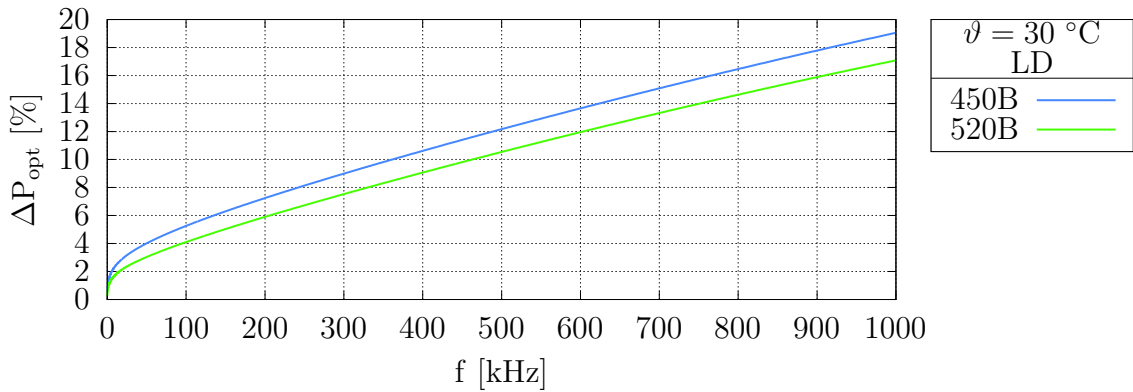


Obr. 2.14: Relativní optický výkon **PLT5 520B** v čase jedné periody spínání s PWM (s rychlými hranami) o střídě 50 % a různých kmitočtech.

2.4.2 Měření se spektrometrem

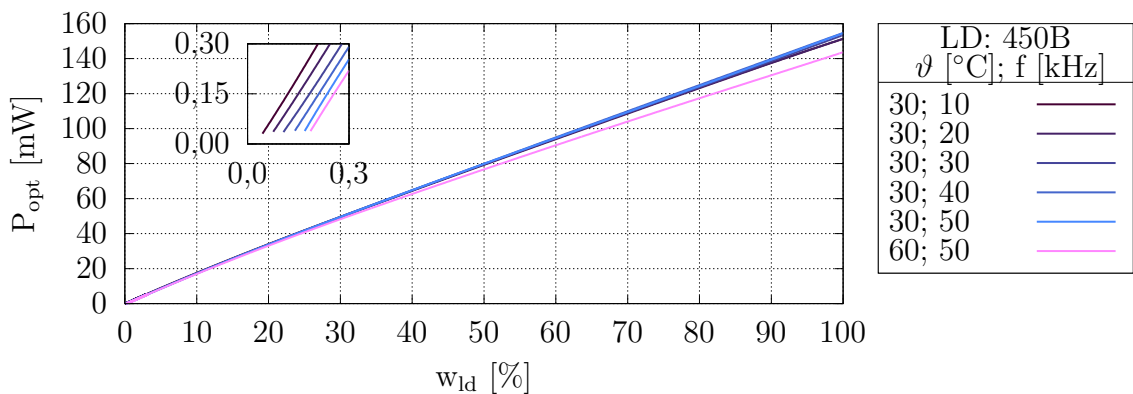
Toto měření bylo zapojeno podle blokového schématu 1.11. U obou LD byly naměřeny lineární výkonové charakteristiky zobrazené v grafech 2.16 a 2.17. Zároveň byl naměřen i pokles optického výkonu s rostoucí teplotou LD. A stejně jako v PWM režimu s pomalými hranami, byl závislý na střídě PWM.

Závislost prahové střídě na kmitočtu (viz 2.18) byla pro obě LD a obě měřené teploty



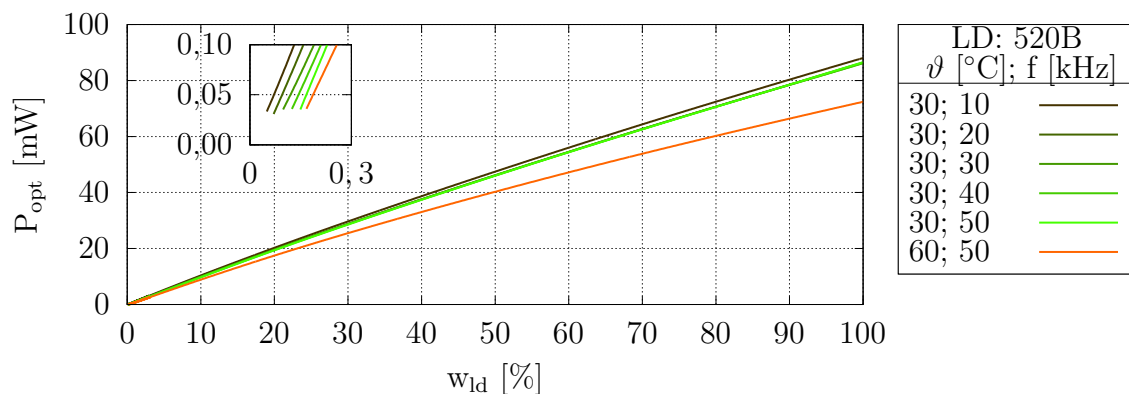
Obr. 2.15: Charakteristika zkreslení optického průběhu vůči kmitočtu PWM (s rychlými hranami) pro obě LD.

téměř lineární. Maximální prahová střída naměřená při řízení navrženým spínačem je téměř nulová. Konkrétně $w_{th} \approx 0,2 \%$.

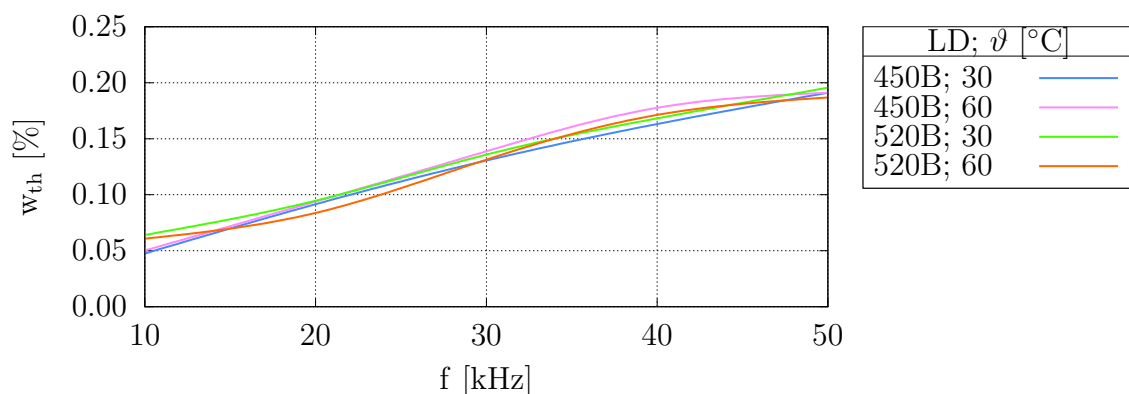


Obr. 2.16: Výkonová charakteristika PLT5 450B v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.

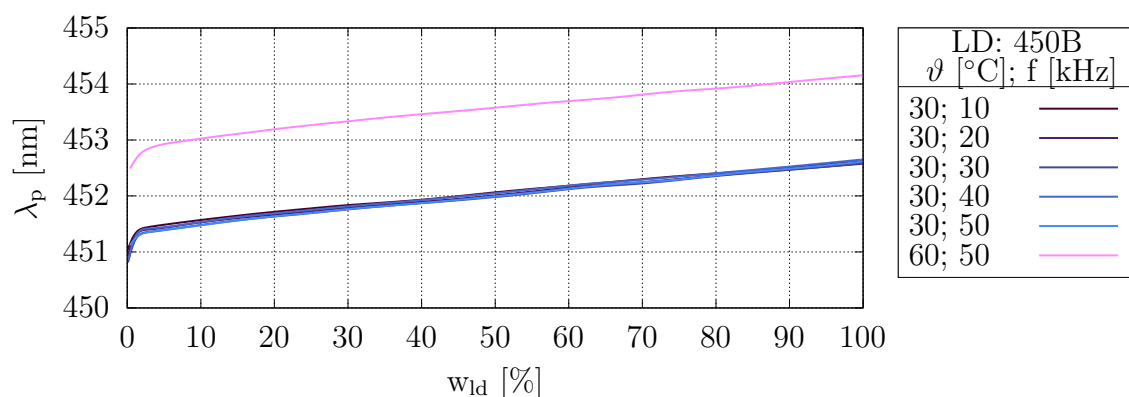
Charakteristiky CWL $\lambda_p [m]$ obou LD (viz 2.19, 2.20) v oblasti nad prahovou střídou vykazují nejprve prudký nárůst a potom mírnější lineární růst. Podobně jako v PWM režimu s pomalými hranami je charakteristika λ_p lineární, až za prahovou střídou. A to od bodů $w_{th_{\lambda bl}} = 0,24 \%$ a $w_{th_{\lambda gr}} = 0,25 \%$. Stejně jako v CW režimu byl pozorován nárůst CWL s rostoucí teplotou, který byl v celé měřené oblasti konstantní.



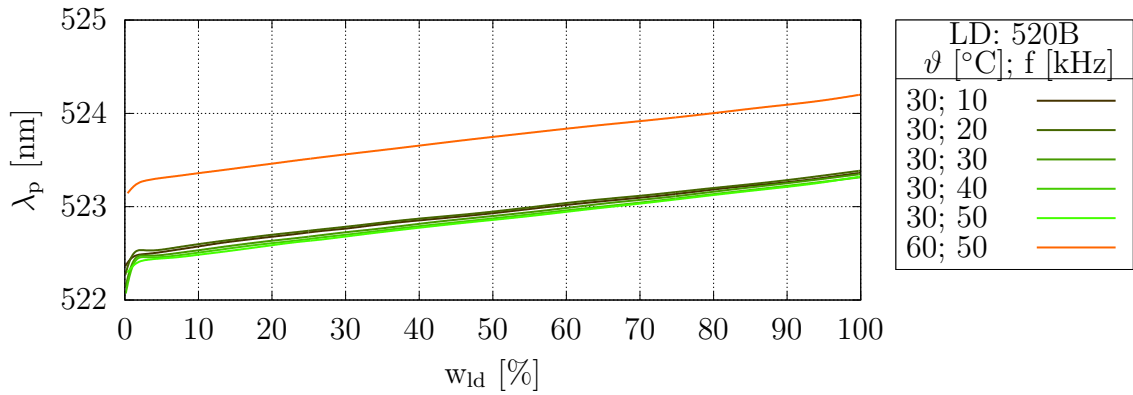
Obr. 2.17: Výkonová charakteristika **PLT5 520B** v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.



Obr. 2.18: Závislost prahové střídy obou LD na kmitočtu spínání v PWM režimu (s rychlými hranami) pro různé teploty.



Obr. 2.19: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 450B** v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.



Obr. 2.20: Charakteristika centrální vlnové délky **PLT5 520B** v PWM režimu (s rychlými hranami) s různými kmitočty a teplotami.

Tab. 2.5: Výčet naměřených výsledků PWM režimu s rychlými hranami.

PLT5 450B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
w_{th} [%], <i>pro</i> ($10 \text{ kHz} \leq f \leq 50 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,05 - 0,19	0,14
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	450,6 - 452,6	2,0
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th_{\lambda bl}} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	451,3 - 452,6	1,3
PLT5 520B		
měřený parametr	rozmezí	rozdíl
w_{th} [%], <i>pro</i> ($10 \text{ kHz} \leq f \leq 50 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	0,07 - 0,19	0,12
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	522,2 - 523,4	1,2
λ_p [nm], <i>pro</i> ($w_{th_{\lambda gr}} \leq w_{ld} \leq 100 \%$; $f = 10 \text{ kHz}$; $\vartheta = 30 \text{ }^\circ\text{C}$)	522,5 - 523,4	0,9

Závěr

V úvodu práce byla stručně vysvětlena teorie pojící se s problematikou měření a proudového řízení LD a definována funkce aproximující reálnou výkonovou charakteristiku, při řízení LD v PWM režimu. Byly uvedeny práce, které v závěru tvrdí, že řízení LD v PWM režimu může být efektivnější a lze pozorovat koherentní záření o nižším světelném toku, než je tomu v CW režimu, a také práce, která upozorňuje na možné snížení životnosti LED při řízení v PWM režimu. V této práci byla vysvětlena motivace k automatizaci teplotně ustáleného měření a prozkoumány její možnosti u dílčích přístrojů podílejících se na experimentech. Přes to, že některé přístroje nebylo možné automatizovat pomocí standardních postupů, byla nalezena alternativní řešení, která měření ve výsledku do velké míry automatizovala. Byl navržen obvod pro spínání proudu LD, a způsob, jakým se navržený spínač zapojuje do systému tvořícího LD driver.

V praktické části byl za pomoci korekční křivky definován způsob, jak získat z naměřených dat hodnoty proudu procházejícího LD. Byly spočítány nejistoty měření. Kvůli nejistotě spektrometru do této práce nebyly zařazeny charakteristiky FWHM spektrální čáry měřených LD. Byl definován způsob, jak z časového průběhu relativního optického výkonu vypočítat jeho zkreslení oproti dokonale pravoúhlým pulzům. Objektivnost tohoto způsobu je diskutabilní, jelikož se do zkreslení promítá i fázový posun oproti spínacímu napětí. Optický signál tak může být například dokonale pravoúhlý, ale přes to vykazovat zkreslení 100%, to kvůli fázovému posunu o 180°.

Výsledky řízení LD v CW režimu korespondují s údaji a grafy uvedenými v KL, což potvrzuje relevantnost výstupních dat měřícího systému. Byl zaznamenán pokles optického výkonu obou LD s jejich rostoucí teplotou. Tento pokles byl v celém proudovém rozsahu nad prahovým proudem konstantní. Zároveň byl naměřen exponenciální vztah mezi teplotou a prahovým proudem. Z toho lze usoudit, že i samotný pokles optického výkonu má vůči teplotě exponenciální charakter. Při konstantní teplotě byl pozorován nárůst CWL s rostoucím proudem. Zároveň při konstantním proudu byl také pozorován nárůst CWL s rostoucí teplotou. Pokud se bere v potaz, že podle KL je napětí na obou LD v propustném stavu téměř stejné, pak po porovnání naměřených výkonových charakteristik je patrné, že **PLT5 450B** je efektivnější v přeměně elektrické energie na světelnou, než **PLT5 520B**. Např. při proudu 140 mA vyzařuje modrá LD více než dvakrát vyšší optický výkon než zelená.

Výsledky řízení LD v PWM režimu korespondují s funkcí teoretické výkonové charakteristiky definované v úvodní části této práce. Při PWM řízení s pomalými hranami lze na začátku výkonové charakteristiky pozorovat nelineární prohnutí směrem k nižšímu výkonu a na konci prohnutí směrem k vyššímu výkonu. Naměřená data prokazují, že doba hran pulzů není o mnohem kratší, než doba periody spínání. Při PWM řízení s rychlými hranami byly naměřené průběhy výkonové char. v celém měřeném rozsahu lineární a jejich počátek byl prakticky v nule. Naměřená data průběhu záření v čase ukazují, že doba hran pulzů je o mnohem kratší, než doba periody spínání. Bylo naměřeno, že vliv teploty na vyzařovaný optický výkon LD při PWM řízení je závislý na střídě. Při malých střídách je vliv teploty zanedbatelný, s rostoucí střídou vliv lineárně roste až po střídu 100%, kdy je vliv teploty stejný jako v CW režimu. V blízkosti prahové střídy byl naměřen prudký růst CWL. Za určitým bodem byl vztah CWL a střídy lineární. Byl naměřen rozdíl rozsahu lineární části CWL charakteristiky mezi CW a PWM řízením. V CW režimu byl tento rozsah 2,5 nm pro [PLT5 450B](#) a 1,8 nm pro [PLT5 520B](#). Zatímco v PWM režimech 1,1 a 1,3 nm pro [PLT5 450B](#) a 0,9 nm pro [PLT5 520B](#). Jde o poloviční snížení rozsahu lineární části CWL charakteristiky v PWM režimu, než-li je tomu v CW režimu.

Přínosy této práce jsou následující. Zaprvé rozšiřuje specifikace LD, při řízení v CW režimu, uvedené v jejich KL. Konkrétně byly naměřeny a zobrazeny výkonové charakteristiky pro některé nové teploty LD. Dále byly uvedeny charakteristiky CWL pro všechny měřené teploty. Pro oblast přechodu mezi spontánní a stimulovanou emisí byla hustota měřených bodů vyšší než u zbytku proudového rozsahu. To umožnilo zobrazit detail v okolí prahového proudu. Naměřená data jsou obsažena v elektronické příloze. Dále tato práce prezentuje návod na realizaci automatizovaného systému, měřícího zmíněné charakteristiky. Také je ukázáno, jak PWM řízení oproti CW řízení linearizuje vztah mezi vstupní nastavovanou veličinou a výstupními radiometrickými veličinami charakterizujícími vyzařovaný svazek LD. Konkrétně jde o vztah mezi proudem resp. střídou PWM a optickým výkonem nebo centrální vlnovou délkou.

Využitelnost této práce může být následující. Pro subjekty hledající možnosti realizace systému pro měření spektrálních charakteristik LD, lze v této práci najít jedno z možných řešení. Naměřená data lze použít jako referenci při používání měřených LD. Navržený spínač lze použít jako koncový stupeň LD driveru pracujícím v PWM režimu.

Je možno provést několik rozšíření této práce. Navrhnout LD driver pro praktické aplikace s dedikovaným módem pro řízení LD v PWM režimu. Design by měl implementovat hlavně spínač s aktivní zátěží a nastavitelným proudem v aktivní úrovni, a generátor PWM pulzů, s nastavitelnou střídou a kmitočtem. Dále je velice žádoucí provést rešerši vlivu PWM řízení na životnost LD. Porovnána by měla být životnost LD v CW režimu s životností v PWM režimu o různých kmitočtech spínání. Také by mohl být prozkoumán charakter fázového posunu vln záření mezi jednotlivými pulzy spínání v PWM režimu. A nakonec by za účelem automatizace měření charakteristik LD, měl být použit spektrometr se standardně programovatelným ovládacím rozhraním.

Literatura

- [1] HABEL, J. – DVOŘÁČEK, K. – DVOŘÁČEK, V. – ŽÁK, P. *Světlo a osvětlování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3. Kapitola 4., s. 57-89.
- [2] CIE. *The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry* [online]. CIE TN 004:2016 [vid. 12. 12. 2022]. Dostupné z: <http://files.cie.co.at/841_CIE_TN_004-2016.pdf>.
- [3] URBAN, F. – MIKEL B. *Optoelektronika*. Elektronické učební texty. FEKT VUT. 304 s. Kapitola 3.5, s. 112.
- [4] BOUŠEK, J. – KOSINA, P. – MOJROVÁ, B. *Elektronické součástky*. Elektronické učební texty. 01.2015 FEKT VUT. 209 s. Kapitola 3.6.1, s. 83.
- [5] HOLLAS M. *Modern spectroscopy*. 4th edition, 2004. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1987. 451 s. ISBN 0-470-84416-7. Kapitola 3.4.4, s. 62-63.
- [6] TOSHIBA. *TOSHIBA CCD Linear Image Senso* [online]. Rev. 1.2, 24.01.2019 [vid. 14. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://cz.mouser.com/ProductDetail/Toshiba/TCD1103GFG8ZAA2?qs=4qgZ1GHix0X0fPiKKqbsUQ%3D%3D>>.
- [7] HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J. – DUB, P. *Fyzika. Svazek 2..* 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1. Kapitola 37.1.
- [8] HALLIDAY, D. – RESNICK, R. – WALKER, J. – DUB, P. *Fyzika. Svazek 2..* 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. (různé stránkování) : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1. Kapitola 34.7, s. 905.
- [9] MIŠEK, J. – KUČERA, L. – KORTÁN, J. *Polovodičové zdroje optického záření*. Praha: SNTL, 1988. ISBN 04-538-88. Kapitola 4.1.1, s. 173-177.
- [10] BOUŠEK, J. – KOSINA, P. – MOJROVÁ, B. *Elektronické součástky*. Elektronické učební texty. 01.2015 FEKT VUT. 209 s. Kapitola 3.7.3, s. 86-88.
- [11] OSRAM LICHT. *PLT5 450B* [online]. ver. 0.5, 22.12.2020 [vid. 08. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.osram.com/ecat/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2220054/>.
- [12] OSRAM LICHT. *PLT5 520B* [online]. ver. 1.3, 09.07.2021 [vid. 08. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.osram.com/ecat/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2220058/>.

- [13] RPMC Lasers. *Multimode Laser Diodes* [online]. rev. 13.9.2021 [vid. 14. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.rpmclasers.com/product/ldx-xxxx-627/>>.
- [14] SLOUKA, M. *Vliv průběhu řídicího proudu na optické parametry laserové diody*. Ostrava, 2021. 59 s. Diplomová práce na fakultě Elektrotechniky a Informatiky na VŠB v Ostravě. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
- [15] LIN, CH. – PAI, K. – CHEN, P. Development and implementation of a laser headlight system for electro-optic characteristic measurement and comparison. *Int J Circ Theor Appl.* 2020, 48: s. 294–307.
- [16] ZAHO, F. Lifetime and Failure Analysis of LEDs Driven by the Constant-Amplitude Current with Pulse Width Modulation. *2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. 2022, s. 1-4.
- [17] PLT5 450B, OSRAM Metal Can TO56. *OSRAM Opto Semiconductors* [online]. 2022 [vid. 08. 12. 2022]. Dostupné z: <https://www.osram.com/ecat/com/en/class_pim_web_catalog_103489/prd_pim_device_2220054/#c5a3118e7198c84bef4adb003cf9e842>.
- [18] THORLABS. *Laser Diode and Temperature Controller – ITC500 Series* [online]. [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.thorlabs.com/catalogpages/417.pdf>>.
- [19] THORLABS. *TCLDM9* [online]. [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.thorlabs.com/catalogpages/obsolete/2017/TCLDM9.pdf>>.
- [20] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL. *BS170 / MMBF170* [online]. rev. I47, 03.2010 [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/149/bs170-292794.pdf>>.
- [21] AVANTES. *AvaSpec-HS2048XL-EVO* [online]. [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.avantes.com/products/spectrometers/sensline/avaspec-hs2048xl-evo/>>.
- [22] Integrating Spheres. *Avantes* [online]. 2022 [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.avantes.com/products/accessories/integrating-spheres/>>.
- [23] AVANTES. *AvaSoft User's Manual* [online]. ver. 8.12, rev. 6-06 [vid. 09. 12. 2022].
- [24] AVANTES. *AvaSoft User's Manual*, str. 59 [online]. ver. 8.12, rev. 6-06 [vid. 09. 12. 2022].

- [25] AVANTES. *AvaSoft User's Manual*, str. 35 [online]. ver. 8.12, rev. 6-06 [vid. 09. 12. 2022].
- [26] Interface Packages and Libraries for Windows and Linux. *Avantes* [online]. 2022 [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.avantes.com/products/software/interface-packages-and-libraries-for-windows-and-linux/>>.
- [27] THORLABS. *PDA36A2* [online]. rev. D, 21.04.2020 [vid. 09. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=PDA36A2>>.
- [28] MANSON. *HCS series catalogue* [online]. rev. 1 04.10.2018 [vid. 10. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.manson.com.hk/product/hcs-3200/>>.
- [29] TEKTRONIX. *Digital Storage Oscilloscopes, TDS1000 Series, TDS2000 Series* [online]. 08.2005 [vid. 10. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.tek.com/en/datasheet/tds1000-and-tds2000-series-oscilloscopes>>.
- [30] RIGOL. *DG1000Z Series Function/Arbitrary Waveform Generator* [online]. 10.2016 [vid. 10. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://www.rigol-uk.co.uk/product/rigol-dg1032z-30mhz-function-arbitrary-waveform-generator/>>.
- [31] Linux kernel. *GITHUB* [online]. 8.10.2022 [vid. 10. 12. 2022]. Dostupné z: <<https://github.com/torvalds/linux/tree/master/drivers/usb/class>>.

Seznam symbolů a zkratek

LD	laserová dioda
KL	katalogový list
TEC	thermo electric cooler (peltiérův článek)
W-A	watt ampérová
DMOS	diffused metal-oxid silicone
DPS	deska plošných spojů
THT	through hole technology
SMT	surface mount technology
CCD	charge-coupled device
IO	input output
GUI	graphical user interface
GPIB	general purpose interface bus
USB	universal serial bus
PWM	pulse width modulation
OS	operační systém
SCPI	standard commands for programmable instruments
CLI	command line interface
VM	virtual machine
FČ	fotovoltaický článek
CCD	charge coupled device
2D	dvou dimenzionální
FPGA	field programmable gate array
asic	application specific integrated circuit
IC	integrated circuit

ADC	analog to digital conversion
CW	continuous wave
TS	teplotní senzor
BP	bakalářská práce
NTA	nejistota typu A
NTB	nejistota typu B
NTC	kombinovaná standardní nejistota
FD	fotodetektor
SM	spetrometr
CWL	central wavelenght
FWHM	full width at half maximum