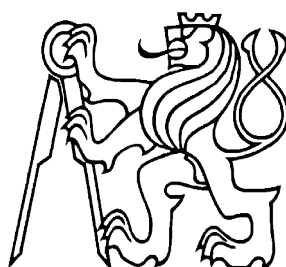


České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole
Obor: Komunikace multimédia a elektrotechnika
Zaměření: Sdělovací technika



Demonstrace interference v laserové diodě

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Martin Valko
Vedoucí práce: Ing. Jan Šístek, Ph. D.
Rok: 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Valko Martin**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační technika

Název tématu: **Demonstrace interference v laserové diodě**

Pokyny pro vypracování:

Popište jevy, které nastávají v laserové diodě, pokud je vysílané záření odraženo zpět za vzniku interferencí v diodě (angl. self-mixing). S použitím vhodné diody a souvisejícího budiče navrhnete uspořádání interferometru pro sledování změn polohy či otáčivého pohybu, v kterém bude tento jev názorně využit. Měřením ověřte předpokládané chování diody. Podle možností ověřte vliv úrovně odraženého záření na průběh detekovaného signálu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Scalise, L., Yu, Y., Giuliani, G., Plantier, G., Bosch, T.: Self-Mixing Laser Diode Velocimetry: Application to Vibration and Velocity Measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 53 (2004), no. 1, pp.223-232.
- [2] Giuliani G., Norgia, M., Donati, S., Bosch, T.: Laser Diode Self-Mixing Technique for Sensing Applications. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, vol. 4 (2002), no. 6, pp. S283–S294.

Vedoucí: Ing. Jan Šístek, Ph.D.

Platnost zadání: LS 2015/2016

Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 11. 2. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Martin Valko

Poděkování

Děkuji Ing. Janu Šístkovi, Ph. D. za vedení mé bakalářské práce, za konzultace a návrhy, které ji obohatily.

Martin Valko

Název práce:

Demonstrace interference v laserové diodě

Autor: Martin Valko

Obor: Komunikace, multimédia a elektrotechnika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Šístek, Ph. D.
Katedra elektromagnetického pole, Fakulta elektrotechnická,
České vysoké učení technické v Praze

Konzultant: ---

Abstrakt: Tato práce objasňuje jevy, které nastávají v laserové diodě, je-li vysílané záření odraženo zpět za vzniku interferencí v samotné laserové diodě. Druhá část práce pojednává o praktické konstrukci návrhu interferometru využívajícího výše zmíněných jevů k měření změn polohy a otáčivého momentu. Součástí práce je protokol o měření zkonstruovaného interferometru, kde nás především zajímá chování laserové diody a ověření vlivu úrovně odraženého záření na průběh detekovaného signálu.

Klíčová slova: Interferometr, interference, fázový posuv, 'self-mixing',
Dopplerovský jev, měření polohy, měření rychlosti

Title:

Demonstration of self-mixing in a laser diode

Author: Martin Valko

Department: Communication, multimedia and electronics

Type of article: Thesis

Supervisor: Ing. Jan Šístek, Ph. D. Department of Electromagnetic Field, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague

Consultant: ---

Abstract: This thesis explains the phenomena that occurs in laser diode when emitted radiation is reflected back to the diode with corresponding interference (so called self-mixing). Second part deals with practical design of an interferometer based on this effect that is capable to measure position changes or rotational movement. Also part of the thesis are results from measurement, especially laser diode behavior and waveforms dependence on reflected radiation level.

Key words: Interferometer, interference, phase shift, self-mixing, Doppler effect, measurement of displaced, measurement of velocity

Obsah

Seznam zkratk.....	I
Seznam symbolů.....	III
1 Úvod.....	1
2 Teorie.....	2
2.1 Popis interference.....	2
2.2 Podmínky pro vznik interference.....	4
2.2.1 Koherentní vlnění.....	4
2.2.2 Polarizační souběh.....	5
2.3 Klasické typy interferometrů.....	6
2.3.1 Michelsonův interferometr.....	6
2.3.2 Mach-Zehnderův interferometr.....	7
2.3.3 Sagnacův interferometr.....	8
2.4 Laserová dioda.....	9
2.5 Self-mixing (česky směšování vlny se sebou samou).....	11
2.5.1 Princip.....	11
3 Návrh experimentu.....	14
3.1 Koherentní délka.....	15
3.2 Specifika budiče LD1100.....	20
3.3 Měření změn polohy.....	22
3.3.1 Určení posuvu.....	24
3.4 Měření otáček.....	25
3.4.1 Měření šířky pásma obvodu fotodiody.....	26
3.4.2 Výsledky měření.....	28
4 Závěr.....	31

Seznam zkratek

	<i>Význam anglicky</i>	<i>Význam česky</i>
A	Amplifier	Zesilovač
B	Driver	Budič
BS	Beam Splitter	Polopropustné zrcadlo
D	Detectors	Detektor
DP	Lowpass filter	Dolní propust
DUT	Device under test	Měřené zařízení
FP	Fabry Perot	Fabry Perot
G	Function generator	Generátor funkcí
K	Collimator	Kolimátor
LD	Laser diode	Laserová dioda
LF	Lasing Field	Vnitřní pole laseru
M	Engine	Motor
Mn	Mirror	Zrcadlo
MI	Michelson's interferometer	Michelsonův interferometr
OSC	Oscillator	Oscilátor
PD	Photodiode	Fotodioda
PP	Piezoelectric actuator	Piezo-posuv
PR	Phase shifter	Fázový zpožďovač
RBW	Resolution Bandwidth	Pásmo RBW
S	Source	Zdroj
SA	Spectrum analyzer	Spektrální analyzátor
SFP	Small-Form Pluggable	Modul SFP

	<i>Význam anglicky</i>	<i>Význam česky</i>
SM	Self-mixing	Samo-směšování (v laserové diodě)
ZV	Feedback	Zpětná vazba

Seznam symbolů

Význam

$\Delta\lambda$	Spektrální šířka
λ	Vlnová délka
v	Rychlost
φ	Fáze
ω	Úhlová rychlost
A	Útlum
C	Parametr zpětné vazby
f_{01}	Zlomová frekvence budiče LD1100
f_{02}	Zlomová frekvence fotodiody
f_D	Dopplerova frekvence
I_{LD}	Budící proud laserové diody
I_{mon}	Monitorovací proud fotodiodou
k	Vlnový vektor
L_C	Koherentní délka

1 Úvod

Pro přesná měření rychlostí a změn polohy se využívá optických interferometrů (paprskových, vláknových, případně planárních) pro jejich vysokou citlivost. Součástí těchto přístrojů nejčastěji bývá polovodičový laser (méně často pak laser plynový či pevnolátkový), děliče výkonu, vazební čočky a detektory. V případě vláknového provedení jsou použity odbočnice, polarizační kontroléry a úseky optických vláken.

Nevýhodou této klasické koncepce jsou náklady na pořízení klasických interferometrů a v neposlední řadě potom rozměry samotných interferometrů. V poslední době se jako jedno z možných řešení ukazuje zapojení, kdy zdroj záření (laserová dioda) je současně i detektorem. Samotná detekce potom probíhá buď v monitorovací fotodiodě (bývá součástí laserové diody), anebo s využitím měření změn napětí na samotném čipu laserové diody. Toto zjednodušení má na druhou stranu kvantitativně horší parametry, které ale nemusí být vždy překážkou. Této nové koncepci je věnována tato bakalářská práce.

2 Teorie

2.1 Popis interference

Předložená práce popisuje specifickou třídu interferometrů a je tedy nutné začít s popisem interference. Mějme dvě vlny (označme je například indexy 1, 2), šířící se podél stejné optické osy z . Pak je v souladu s článkem [1] platný vztah:

$$E(z) = E_1(z) + E_2(z) \quad (1)$$

, kde $E_1(z)$, $E_2(z)$ jsou komplexní amplitudy intenzit.

Ze vztahu je patrné, že výsledkem je opět monochromatická vlna se stejnou frekvencí a komplexní amplitudou $E(z)$. Intenzity jednotlivých vln jsou určeny jako:

$$I_1 = |E_1(z)|^2 \quad ; \quad I_2 = |E_2(z)|^2 \quad (2)$$

Intenzitu výsledné amplitudy $E(z)$ určíme ze vzájemného dosazení (1) do (2):

$$I = |E(z)|^2 = E(z) \cdot E^*(z) = |E_1(z)|^2 + |E_2(z)|^2 + E_1(z) \cdot E_2^*(z) + E_2(z) \cdot E_1^*(z) \quad (3)$$

Pozn.: operátor '' říká, že je příslušný člen komplexně sdružený; parametr 'z' udává směr ve kterém se vlna šíří.*

Zřejmou závislost na parametru z pro jednoduchost vypouštíme. Dosazením

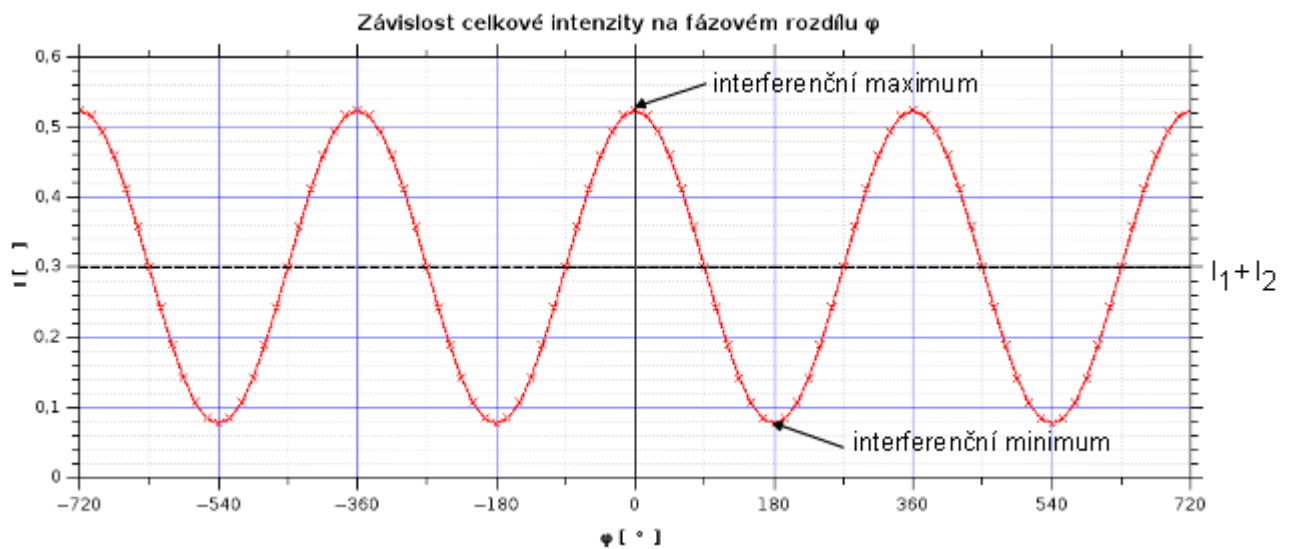
$$E_1 = I_1^{\frac{1}{2}} \cdot e^{j\varphi_1} \quad ; \quad E_2 = I_2^{\frac{1}{2}} \cdot e^{j\varphi_2}$$

do vztahu (3), kde φ_1, φ_2 jsou fáze obou vln, dostaneme tzv. interferenční rovnici, popisující výkon měřený detektorem interferometru:

$$I = |E|^2 = I_1 + I_2 + (I_1 \cdot I_2)^{\frac{1}{2}} \cdot [e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)}] = I_1 + I_2 + 2 \cdot (I_1 \cdot I_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\varphi) \quad (4)$$

Z interferenční rovnice (4) je zřejmé, že velikost intenzity I není rovna pouze součtu intenzit vln, ale že je zde navíc přítomen člen, zastupující interferenci mezi vlnami. Jeho velikost je dána rozdílem fází $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ a je současně i důvodem, proč nelze aplikovat princip superpozice v případě intenzit. Tento člen může být:

- kladný – pak jde o tzv. konstruktivní interferenci
- záporný – destruktivní interferenci



Obr. 1. - Grafické znázornění interferenční rovnice

Pozn.: Obr. 1. odpovídají intenzity o velikostech $I_1 = 0,25$ a $I_2 = 0,05$; Pro názornost jsou v grafu vyznačena interferenční maxima/minima a střední hodnota intenzity $I_1 + I_2$ (odpovídající $\pi/2$ nebo $3\pi/2$).

Z Obr. 1. je patrné, že pokud jsou intenzity I_1 a I_2 rozdílné, dochází k posunutí interferenčních maxim a minim. Prakticky to znamená, že interferenční maxima (minima) nikdy nedosáhnou svých maximálních (minimálních) hodnot. V případě že jsou si intenzity rovny ($I_1 = I_2$) je maximální hodnota intenzity ($\varphi = 0$) rovna čtyř-násobku intenzity každé z vln a minimální hodnota intenzity ($\varphi = \pi$) je rovna nule.

2.2 Podmínky pro vznik interference

Pro vznik interference je nutné dodržet následující podmínky:

- a) Použití zdroje o vysoké koherenci tzn. takový, který má vysoce stabilní vlnovou délku (respektive úzkou spektrální čáru) a definovanou stálou rovinu polarizace.
- b) Prostředí, kterým se vlny šíří by mělo rovinu polarizace udržovat. Pokud tak tomu nebude, může dojít ke stočení roviny polarizace jedné z vln vůči druhé. Následkem stočení roviny dojde k poklesu amplitudy interferencí.
- c) Pro největší rozdíl mezi interferenčními maximy a minimy musí mít obě interferující vlny srovnatelnou amplitudu.

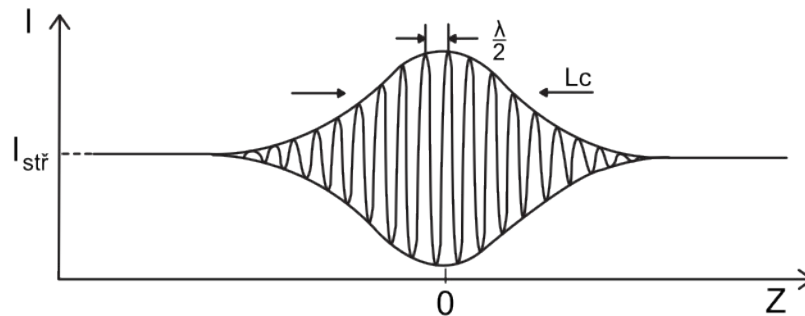
2.2.1 Koherentní vlnění

Jedná-li se o vlnění ze dvou různých zdrojů (vzájemně nezávislých), pak mezi fázovými posuny není žádný pevný vztah. Tzn., že se φ_1 a φ_2 (fáze jednotlivých vln) mění zcela nahodile a výsledný fázový posun tak nabývá nahodilých hodnot v intervalu $\langle 0; 2\pi \rangle$. Po dosazení do interferenční rovnice (4) nabývá člen $\cos(\varphi)$ hodnot v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$, jehož střední hodnota je rovna nule a nedochází tak interferenci. Aby tedy docházelo k interferencím, je nutné, aby rozdíl φ_1 a φ_2 byl stálý (respektive vzájemně pevně svázán). Další podmínkou související s koherentním vlněním je požadavek na úzkou šířku spektrální čáry koherentního zdroje záření (dále jen $\Delta\lambda$). S šířkou spektrální čáry úzce souvisí tzv. koherentní délka L_C jenž je s $\Delta\lambda$ svázána vztahem:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n \cdot L_C} \quad (5)$$

Pozn.: n je ve vztahu (5) index lomu materiálu

Tato délka udává maximální počet vlnových délek, o které se mohou lišit nezpožděné vlny od vln zpožděných, aby ještě interference nastala. Obr. 2. zobrazuje průběh interferencí, když se rozdíl délek ramen Δz mění do kladných i záporných hodnot. Pozorujeme, jak amplituda postupně klesá na obě strany.



Obr. 2.- Průběh interferencí v závislosti na změně délky ramen interferometru [2]

Pozn.: I je intenzita. Maximální hodnota amplitudy je pozorovatelná v bodě $z=0$, tohoto bodu dosáhneme v případě, že jsou obě ramena interferometru stejně dlouhá.

2.2.2 Polarizační souběh

Podmínka polarizačního souběhu říká, že vlny které mají spolu interferovat, musí mít stejnou rovinu polarizace. Rozdílné roviny polarizace vznikají například vygenerováním dvou stejných, ale vzájemně kolmo orientovaných vidů nebo nedokonalostí optického vlákna, kdy vlákno není kruhově symetrické, a proto stáčí rovinu polarizace. V případě, že jsou vlny vzájemně na sebe kolmé, jsou interference neměřitelné, v případě, že jsou rovnoběžné, dosahují největších maxim/minim. V praxi se pro korekci polarizační roviny používají tzv. polarizační kontroléry, jež jsou schopny stáčet rovinu polarizace. Další možnosti jak nastavit správnou hodnotu roviny polarizace je použití speciálních optických vláken (tzv. *PMF* vláken) [nejpoužívanějšími vlákny *PMF* jsou: *EC*, *BT*, *PANDA*].[3]

2.3 Klasické typy interferometrů

Přestože je tato práce zaměřena na popis tzv. *self-mixingu*¹ v laserových diodách, je nanejvýš vhodné popsat klasické typy interferometrů, aby vynikly odlišnosti od jejich konstrukce. Interferometry na základě jejich konstrukce můžeme rozdělit do tří základních skupin:

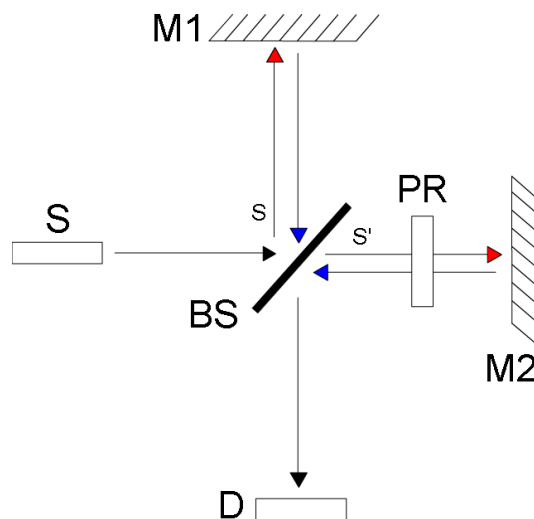
- Paprskové – klasická paprsková optika
- Vláknové – vláknová optika (optické kabely)
- Planární – integrované hybridní obvody

Mezi nejznámější interferometry patří Michelsonův, Mach-Zehnderův a Sagnacův interferometr jejichž konstrukce jsou popsány dále.

2.3.1 Michelsonův interferometr

Zapojení Michelsonova interferometru je vyobrazeno na Obr. 3. Světelný paprsek z koherentního zdroje S (nejčastěji jím bývá laser) dopadá na polopropustné zrcadlo BS . Polopropustné zrcadlo dělí výkon svazku v definovaném poměru (optimálně v poměru 1:1) na dva paprsky jdoucí po dvou různých dráhách s a s' . Dráha s' obsahuje zpožďovací člen PR způsobující fázové zpoždění paprsku. Toto zpoždění bývá nejčastěji způsobeno změnou délky dráhy, kterou paprsek překonává, nebo změnou prostředí, kterým se paprsek šíří (toho dosáhneme například změnou tlaku). Na konci každé dráhy je umístěno zrcadlo $M1(2)$, které odráží světelný paprsek zpět na BS , kde dochází k superpozici paprsků. Tato interference je snímána detektorem D .

¹ self-mixing – samo-směšování (pro nepřesnost českého ekvivalentu bude nadále užíváno orig. znění)



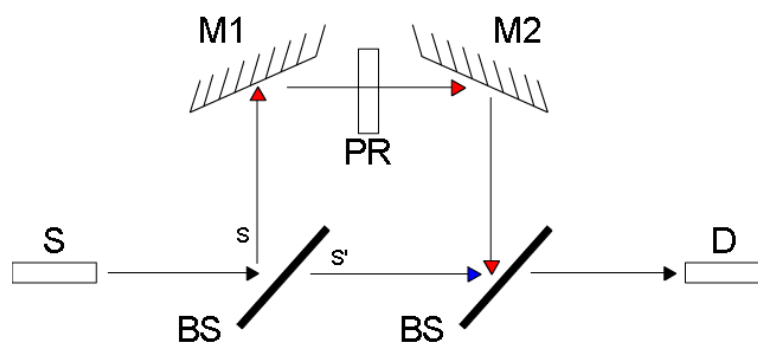
Obr. 3. - Blokové schéma Michelsonova interferometru

Pozn.: Vedle uspořádání interferometrů v provedení pro paprskovou optiku existují i rovnocenná uspořádání v provedení pro vláknovou optiku. V provedení pro vláknovou optiku je polopropustné zrcadlo nahrazeno vláknovou odbočnicí a přímé úseky jsou nahrazeny optickými vlákny. Vhodné je použít i polarizační kontrolér jenž koriguje stáčení polarizační roviny. V případě zrcadel existují i zrcadla vláknová, nejčastěji se však používá tzv. kolimátorů, kdy je záření z konce vlákna (rozbíhavé) upraveno do minimálně rozbíhavé podoby (kolimované) a nasměrováno na objekt, který zkoumáme (s odrazným povrchem).

2.3.2 Mach-Zehnderův interferometr

Z Obr. 4. vidíme, že vlna je na polopropustném zrcadle *BS* rozdělena do dvou svazků *s* a *s'* šířících se podélně v jednom směru. Dráha odbočeného svazku *s* je směřována pomocí zrcadel *M1* a *M2* přes fázový zpoždovač *PR* na, v pořadí druhé, polopropustné zrcadlo *BS*. Druhý, přímý, svazek jde na *BS* již přímo. Z principu je patrné, že se jednotlivé svazky šíří pouze jedním směrem a to od koherentního zdroje *S* k detektoru *D*. Na rozdíl od Michelsonova interferometru (dále jen *MI*) toto zapojení vyžaduje hned dvě polopropustná zrcadla *BS*. Tento interferometr má oproti *MI* nevýhodu v menší citlivosti. To je způsobeno právě díky tomu, že světelný svazek prochází přes *PR* pouze jednou (*PR* je v praxi

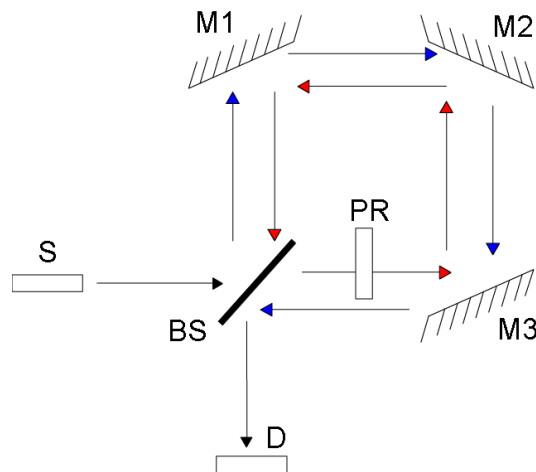
reprezentován libovolným měřeným předmětem jenž umožňuje zpoždění fáze daného svazku) .[2].



Obr. 4. - Blokové schéma Mach-Zehnderova interferometru

2.3.3 Sagnacův interferometr

Mnohem častěji se setkáme s označením '*kruhový interferometr*'. Princip tohoto interferometru spočívá v rozdělení Gaussova svazku polopropustným zrcadlem *BS* na dva svazky. Ty jsou dále pomocí zrcadel *M1(2,3)* směřovány po uzavřené dráze ve vzájemném protisměru zpět na polopropustné zrcadlo. Po opětovném dopadu svazků na polopropustné zrcadlo dojde k jejich vzájemné superpozici, kterou snímáme detektorem *D*. Abychom zaznamenali interference, musíme vložit do jednoho ze svazků fázový zpožďovací člen *PR*. Principiální schéma je na Obr. 5.

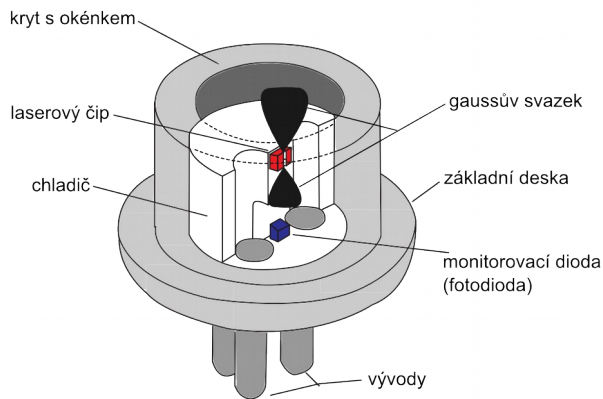


Obr. 5. - Blokové schéma Sagnacova interferometru

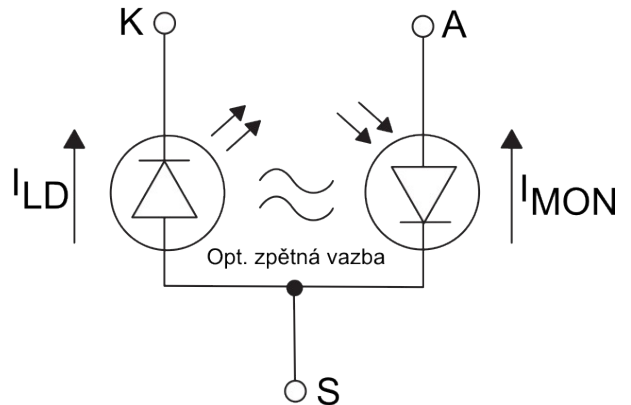
Pozn.: V praxi se uspořádání pro paprskovou optiku nepoužívá. Nejčastější zastoupení má ve vláknové konstrukci. Zde je tvořen kruhovou smyčkou z optického vlákna a vláknovou odbočnicí s rezonanční vazbou RC (nebo tavenou spojkou FC) namísto polopropustného zrcadla. Aplikace tohoto interferometru je například v leteckém průmyslu jako gyroskop[4].

2.4 Laserová dioda

Vnitřní uspořádání klasické laserové diody nejlépe demonstruje Obr. 6a. a schematické vyjádření ukazuje Obr. 6b.



Obr. 6a.- vnitřní uspořádání laserové diody



Obr. 6b.- Schématické uspořádání s optickou zpětnou vazbou

Pozn.: Součástí přílohy je také náčrt laserové diody v řezu (viz. ~/grafika/LD_slozeni.png). Oba obrázky jsou převzaty a upraveny pro tuto práci z [5]

Pomocí vystupujících *Gaussovských svazků* je v Obr. 6a. ukázáno, že tyto svazky vystupují z obou stran laserového čipu. Díky tomuto faktu existuje možnost využití jednoho ze svazků k monitorování výstupního výkonu. Výstupní výkon monitorujeme pomocí fotodiody umístěné v ose vyzařování. Tímto uspořádáním vytvoříme tzv. optickou zpětnou vazbu. Takto umístěnou fotodiodou prochází monitorovací proud, který je přímo úměrný záření laseru [5]. U laserů je monitorování výstupních výkonů klíčové, neboť s rostoucí teplotou dochází k růstu výkonu už při nižším budícím proudu I_{LD} . To je velmi nebezpečné, protože bez regulace tohoto proudu dojde ke spálení diody. Dioda dále obsahuje kryt s okénkem. Toto okénko může mít různé úpravy (především u dražších laserových diod) jako je například antireflexní vrstva apod. Pro speciální aplikace (především v telekomunikacích) mohou pouzdra diod obsahovat navíc zrcátka a čočky, jenž zaostřují vystupující svazek. Toto je výhodné chceme-li například diodu navázat na optické vlákno.

Hodnota zpětně navázaného výkonu se pohybuje mezi 0,1 - 10% vyzařené výkonu laserovou diodou. [6] Tato zpětná vazba je velice důležitá, jelikož v zapojení jako *self-mixing* se právě tato zpětná vazba stane zdrojem jedné z interferujících vln (druhá z vln je přivedená zpětným odrazem od *DUT* (Device Under Test)).

2.5 Self-mixing (česky směšování vlny se sebou samou)

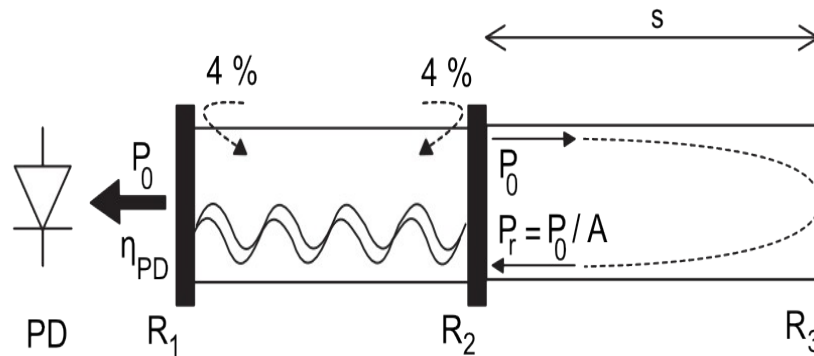
Klasická interferometrie (laserová) je široce rozšířená technika. Uplatnění má například pro měření vibrací, vzdáleností, nerovností povrchů a rychlostí (i pro měření rychlostí kapalin, v praxi se nejčastěji setkáme například s průtokoměry krve). Nicméně tyto klasické metody interferometrie vyžadují externí interferometry (nejčastěji pak Michelsonův nebo Mach-Zehnderův). Tyto interferometry jsou tvořeny vícero čočkami, hranoly, zrcadly a v poslední řadě detektorem. Dále vyžadují externí zdroj koherentního záření – typicky laseru (méně často se využívá bílého světla). [7] Nabízí se však otázka, zda v případě polovodičové laserové diody, nelze vnitřní fotodiodu laseru využít i v roli *fotodetektoru* (tedy nad rámec její primární funkce, jako stabilizátoru optického výkonu). Dostali bychom tak velice citlivý detektor. Pro sestavení bezkontaktního měřicího přístroje založeného na *self-mixing* postačují běžně vyráběné *FP LD* (Fabry Perot Laser Diode). Přednosti metody *self-mixing* jsou:

- není zapotřebí externích detektorů
- není zapotřebí externích interferometrů
- relativně vysoká citlivost (v závislosti na druhu koherentní detekce můžeme dosáhnout až úrovně kvantového šumu)[7]

Všechny výše zmiňované výhody jsou charakteristické jedním faktorem a to pořizovacími náklady. Interferometry na bázi *self-mixing* jsou mnohem jednodušší a levnější.

2.5.1 Princip

Tradiční uspořádání *self-mixing* interferometru je vyobrazeno na obr. 7. Jde vlastně o ekvivalent třízrcadlové laserové rezonanční dutiny. V obrázku je P_0 vyzářovaný výkon a P_r zpětně dopadající výkon. Tento výkon je utlumený o hodnotu $A > 1$, která vyjadřuje útlum vnějšího prostředí daného vzdáleností S .



Obr. 7.- Principiální schéma self-mixing

Pozn.: R_1 a R_2 jsou odrazy na koncích dutiny a R_3 odraz od měřeného objektu. Na koncích dutiny laseru se odráží asi 4% výkonu. Parametr η_{PD} vyjadřuje kolik z vyzářovaného výkonu se skutečně dostane na fotodiodu PD.

Self-mixing je postaven na tzv. injekčně-detekčním principu. Výklad podle článku [7] můžeme zjednodušeně interpretovat následovně. V rezonanční dutině laseru je *záření samotné diody*¹ E_0 . K tomuto záření se přidává záření odražené od měřeného objektu zpět do dutiny. V dutině tyto vlny vzájemně interferují, tedy hraje zde roli jejich vzájemná fáze Φ , která závisí na rozdílu drah obou vln. Pro vyzářovaný výkon takto ovlivněného laseru můžeme napsat následující rovnici:

$$P(\Phi) = P_0 [1 + mF(\Phi)] \quad (6)$$

Pozn.: ve vztahu (6) je P_0 vyzářovaný výkon, m je modulační index a $F(\Phi)$ je periodická

¹ z anglického Lasing Field

funkce s fází Φ a periodou 2π . Se změnou vyzařovacího výkonu dochází i k nepatrným změnám vlnové délky LD (především mění-li se vyzařovací výkon k nižším hodnotám).

Modulační index a tvar funkce $F(\Phi)$ jsou závislé na tzv. parametru zpětné vazby C , jenž je definovaný následovně:

$$C = \frac{ks \sqrt{1 + \alpha^2}}{L_{las} n_{las}} \quad (7)$$

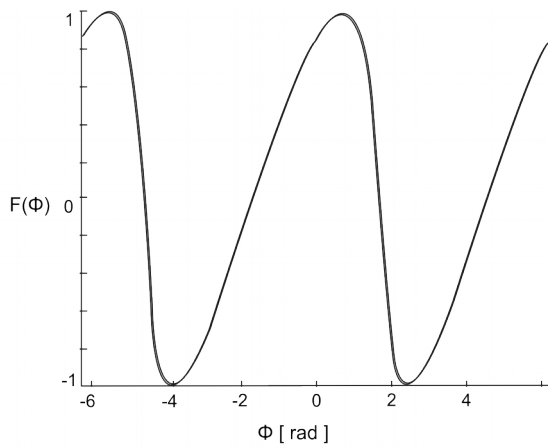
, kde α je faktor rozšíření, L_{las} délka rezonanční dutiny laseru, n_{las} index lomu v rezonanční dutině. Koeficient k je definován jako:

$$k = \frac{\varepsilon}{\sqrt{A}} \frac{1 - R_2}{\sqrt{R_2}} \quad (8)$$

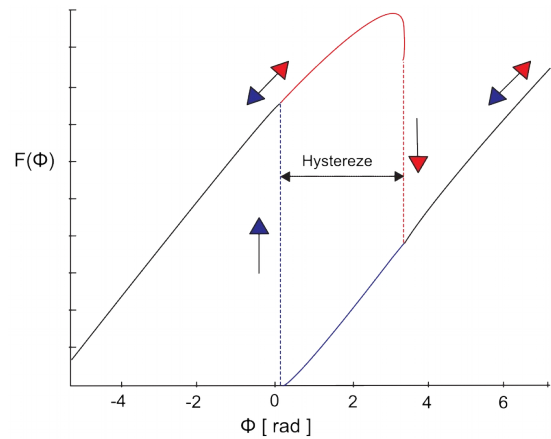
, kde $\varepsilon \ll 1$ míra nepřizpůsobení odraženého a vyzářeného vidu, A je celkový optický útlum na dráze s (viz. obr. 7.) a R_2 je výstupní výkonová odrazivost.

Parametr C je velmi důležitý, protože na jeho základě rozlišujeme následující zpětnovazební režimy:

- Velmi slabá zpětná vazba – pro $C \ll 1$, funkce $F(\Phi)$ je kosinus, modulační index je $\sim 1/\sqrt{A}$
- Slabá zpětná vazba – pro $0,1 < C < 1$, funkce $F(\Phi)$ je zkreslená (s nesymetrickými hranami), modulační index je stejný jako v případě velmi slabé vazby (viz. Obr. 8a.)
- Středně slabá zpětná vazba – pro $1 < C < 4,6$ funkce $F(\Phi)$ nabývá tří hodnot v závislosti na fázi $\Phi \rightarrow$ dochází ke dvěma stabilním stavů a jednomu nestabilnímu, interferenční signál se stává pilovitým (objevuje se zde i hystereze, viz. Obr. 8b.)
- Silná zpětná vazba – pro $C > 4,6$, funkce $F(\Phi)$ může nabývat až pěti hodnot



Obr. 8a.- Slabá zpětná vazba,
převzato z [7]



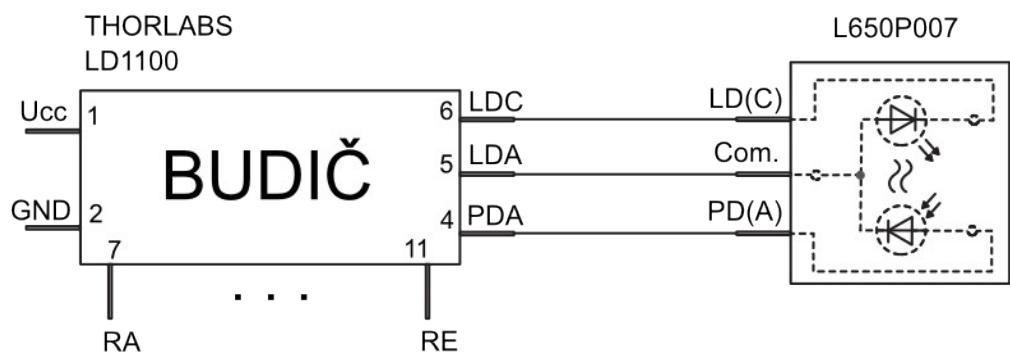
Obr. 8b.- Středně slabá zpětná vazba,
převzato z [7]

Pozn.: Funkce $F(\Phi)$ byla vypočítána pro následující parametry C : Obr. 8a. $\rightarrow C = 0,7$; Obr. 8b. $\rightarrow C = 3$; V experimentální části této práce jsem proměřil interferenční průběhy v různých režimech zpětné vazby. Přidružené režimy zpětných vazeb byly určovány orientačně, tj. na základě výstupních průběhů.

Podaný výklad lze shrnout tak, že koeficient C je závislý na L_{las} , s a A . Těmito veličinami můžeme v reálném interferometru ovlivnit křivku interferencí.

3 Návrh experimentu

Cílem této práce je demonstrovat praktické chování *self-mixingu*. Pro tento účel byla vybrána koncepce podle článků [7][2]. Aby byl celý koncept jednodušší na manipulaci (respektive jeho sestavení) požadovali jsme, aby zdroj koherentního záření emitoval ve viditelné oblasti (tj. optimálně v rozmezí 630-670 nm). Dalším požadavkem byla úzká spektrální čára jako podmínka dlouhé koherentní délky, čímž vznikla možnost mít měřený objekt *DUT* poměrně daleko od laserové diody (*DUT* nemůže být dále než $L_c/2$, jinak dochází k poklesu amplitudy a jev *SM* tak nelze detekovat). Z tohoto důvodu byla objednána dioda firmy THORLABS L650P007. (Katalogový list diody L650P007 je součástí přílohy na přiloženém DVD). Napájení laserové diody zajišťoval budič firmy THORLABS LD1100. Tento budič zajišťuje konstantní výstupní výkon *LD*, který lze volitelně nastavovat pomocí kombinace rezistorů (RA, RB, RC, RD, RE) jimiž se vybere rozsah I_{mon} . Pro jemné doladění potom slouží trimr. Zjednodušené blokové schéma zapojení budiče s laserovou diodou *LD* je na Obr. 9.

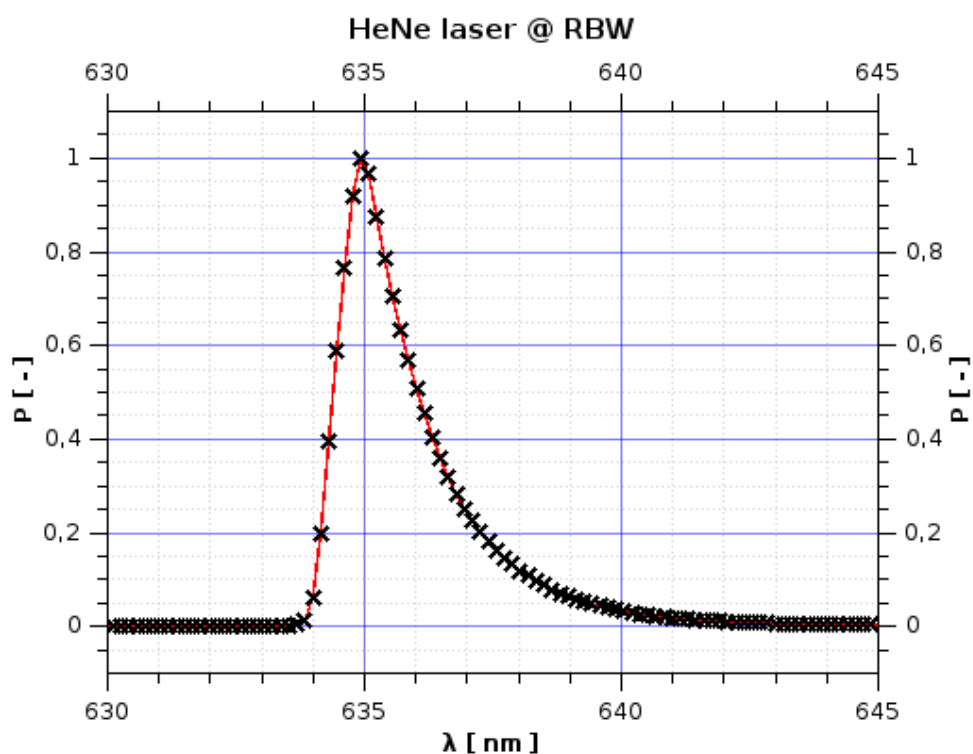


Obr. 9.- Blokové schéma budiče LD1100 s laserovou diodou L650P007

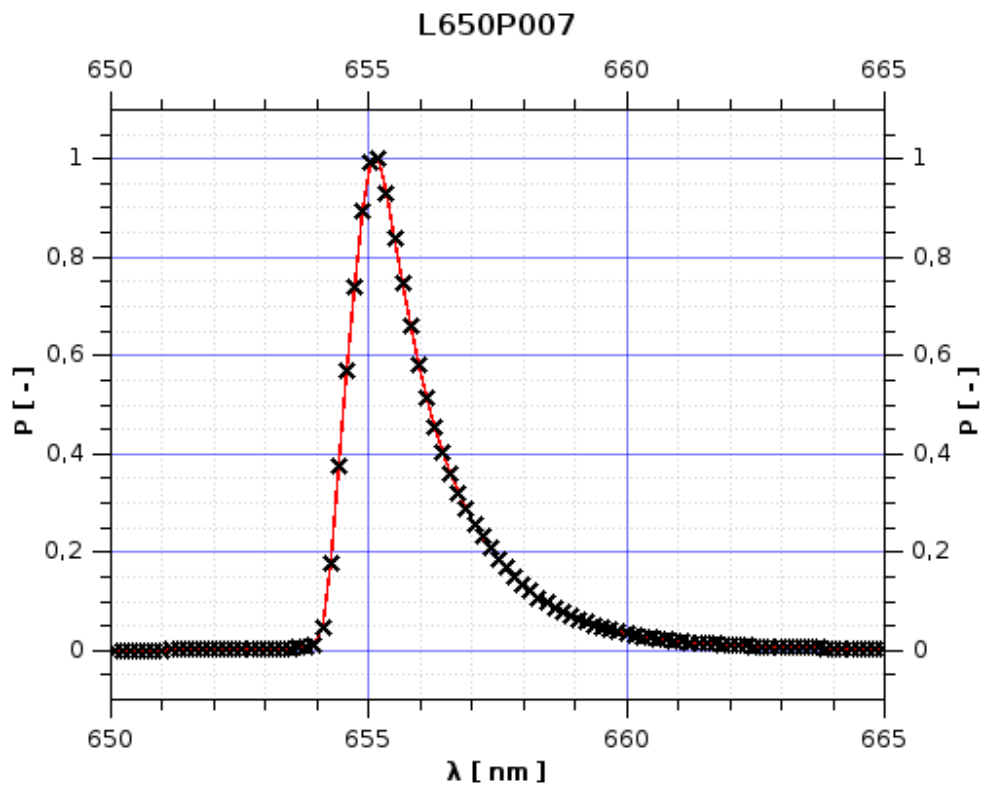
3.1 Koherentní délka

Pro měření spektrální šířky ($\Delta\lambda$) laseru L650P007 bylo použito spektrometru OCEAN OPTICS SIR 1700CD. Pokud by byla šířka spektrální čáry srovnatelná, či větší než RBW (Resolution Bandwidth) přístroje, bylo by možné ji zjistit. Vzhledem k tomu, že tento přístroj nemá ale výrobcem definovanou hodnotu RBW, bylo zapotřebí tuto hodnotu změřit.

První pokus o její zjištění byl proveden pomocí HeNe zdroje, který mívá čáru úzkou a zřejmě i užší než tento přístroj. Avšak po přepojení na diodu L650P007 měřená šířka poklesla, z čehož vyplývá, že čára této diody je dokonce užší než u HeNe laseru, a proto tímto analyzátozem nezjistitelná. Změřená spektra HeNe laseru a laserové diody L650P007 uvádí grafy na Obr. 10., 11.



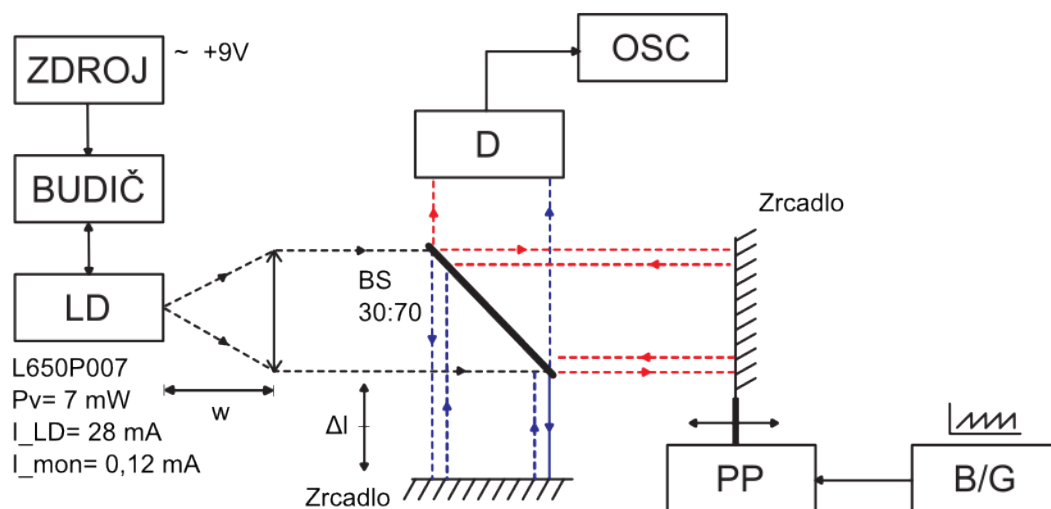
Obr. 10.- Měření RBW pomocí HeNe laseru ($\Delta\lambda = 2,5$ nm)



Obr. 11.- Měření spektrální šířky laseru L650P007 ($\Delta\lambda = 1,6$ nm)

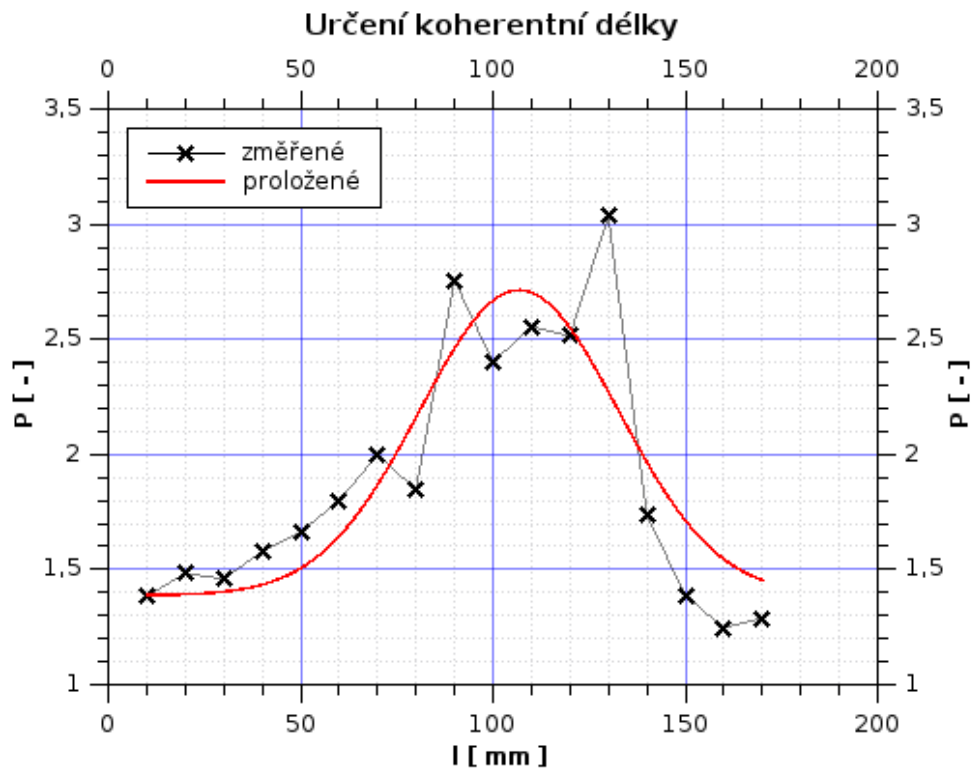
Pozn.: Originální datový výstup ze spektrometru OCEANSOPTICS SIR 1700CD je součástí přiloženého DVD (soubory: spektrometr_HeNe.smir; spektrometr_LD650P007.smir). V části měření RBW pomocí HeNe laseru byl navíc do obvodu zařazen filtr o jmenovité hodnotě 30 dB.

Za těchto okolností bylo třeba změřit šířku spektrální čáry jinak. Využili jsme možnosti přepočtu z koherentní délky, kdy jsme právě tuto veličinu změřili. Princip měření vyplývá přímo z definice koherentní délky (viz. kapitola 2.2.1 Koherentní vlnění). Zapojení pro měření koherentní délky je na Obr. 12.



Obr. 12.- Měření koherentní délky laserové diody L650P007 pomocí M. interferometru

Měření L_c bylo prováděno klasickým Michelsonovým interferometrem. Obě ramena mají stejnou vzdálenost (měřeno od polopropustného zrcadla BS). Tato ramena jsou zakončena zrcátky, která odráží svazek zpět k polopropustnému zrcadlu, kde dochází k interferencím, které snímáme pomocí detektoru D. Pro splnění interferenční podmínky je jedno ze zrcátek rozmítáno pomocí polohovatelného optického stolečku s piezo posuvem PP. Ten je napájen přes budič B pilovitým průběhem napětí z generátoru funkcí G. Interference snímané detektorem D zobrazíme v časové oblasti pomocí osciloskopu OSC. Délka jednoho ramene byla postupně měněna vůči druhému, čímž amplituda interferencí postupně klesala (efekt konečné L_c). Získané hodnoty jsou vyneseny v grafu na Obr. 13.

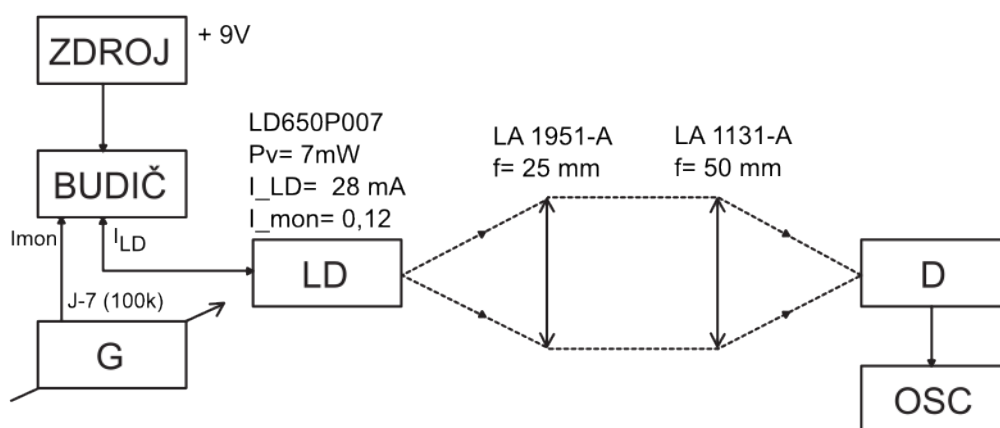


Obr. 13.- Graf změřené amplitudy interferencí pro určení koherentní délky L_c

Správnost měření potvrzuje fakt, že očekávaným výstupem byla Gaussova křivka. Koherentní délku odečítáme na ose x , v místech, kde úroveň P (relativní výkon) klesne na jednu polovinu svoji maximální hodnoty. Dále nesmíme zapomenout vzít v úvahu fakt, že se jedná o Michelsonův interferometr a svazek tedy tuto vzdálenost překonává dvakrát (nejprve po průchodu polopropustným zrcadlem a následně po zpětném odrazu od zrcadla). Výsledkem měření je koherentní délka $L_c = 123,3$ mm, což odpovídá šířce spektrální čáry $\Delta\lambda = 0,00342$ nm.

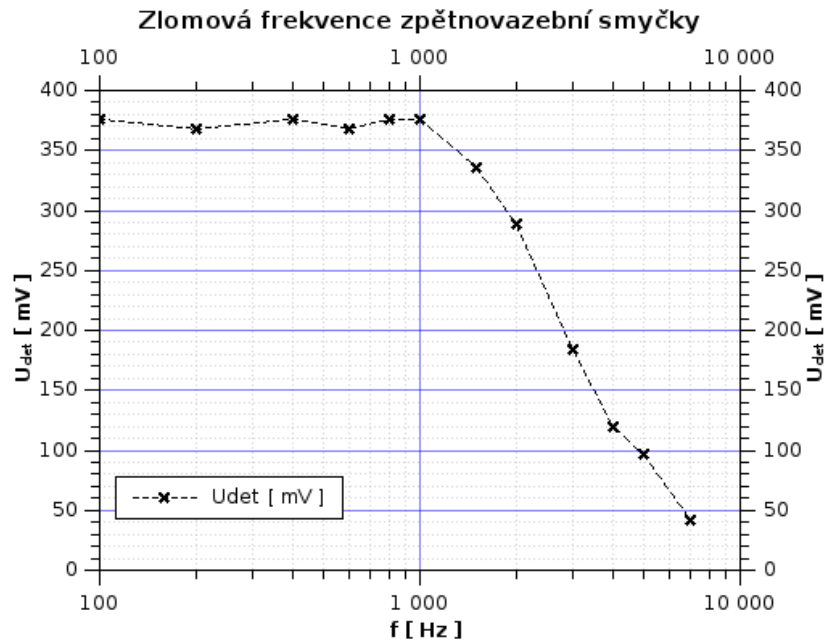
3.2 Specifika budiče LD1100

Hlavní funkcí budiče zapojeného v obvodu je vykonávat stabilizaci laserové diody pomocí zpětnovazebního obvodu. Tento obvod je tvořen fotodiodou, do které se naváže cca 1% vyzářeného výkonu (viz. kap. 2.4 Laserová dioda). Použitím metody *self-mixing* dochází k ovlivňování signálu zpětnovazební diody přidáním druhé interferující vlny. Protože funkcí budiče je udržovat signál této diody konstantní, bude docházet ke změnám pracovního bodu laserové diody. Proto bylo zapotřebí omezit zpětnou vazbu v případě interferujícího signálu. K tomu byla využita vnitřní časová konstanta (integračního článku – viz. příloha 3.), kdy zpětnovazební signál leží pod jeho mezním kmitočtem, zatímco interferující signál nad ním. Důsledkem toho není možné v tomto uspořádání sledovat nepohyblivé cíle (cíle se musí pohybovat, aby se minima, respektive maxima střídala s určitou frekvencí). Zjištění mezní frekvence integrátoru bylo provedeno za použití generátoru funkcí, jehož signál se superponoval na proud I_{mon} , přes svorku J-7. Zapojení pro měření zlomové frekvence je na Obr. 14.

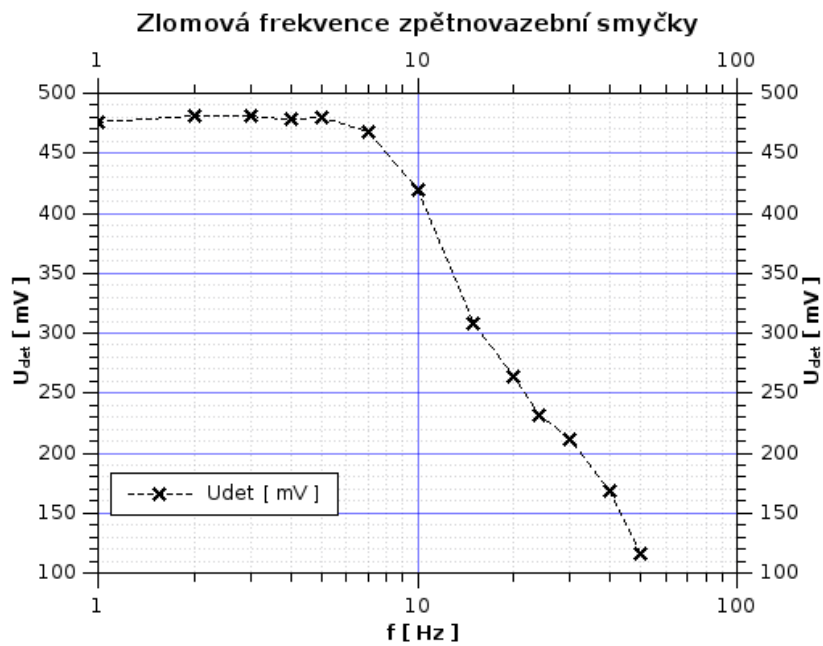


Obr. 14.- Měření zlomové frekvence budiče LD1100

Měřením byla zjištěna odpovídající mezní frekvence 1 kHz (Obr. 15.). Hodnotu této frekvence jsme snížili paralelním přidáním kondenzátoru o jmenovité kapacitě 22 μF .



Obr. 15- Zlomová frekvence zpětnovazební smyčky s kondenzátorem $C_2 = 0,5 \mu\text{F}$

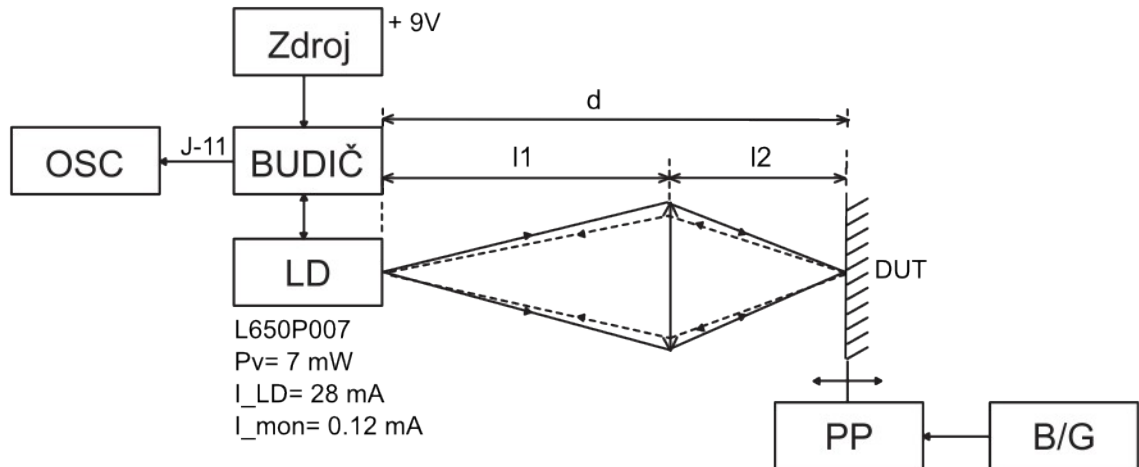


Obr. 16.- Zlomová frekvence zpětnovazební smyčky s kondenzátorem $C_2 = 22 \mu\text{F}$

Po úpravě kapacity se bod zlomové frekvence přesunul k hodnotě 10 Hz.

3.3 Měření změn polohy

Aparatura je sestavena dle následujícího Obr. 17.

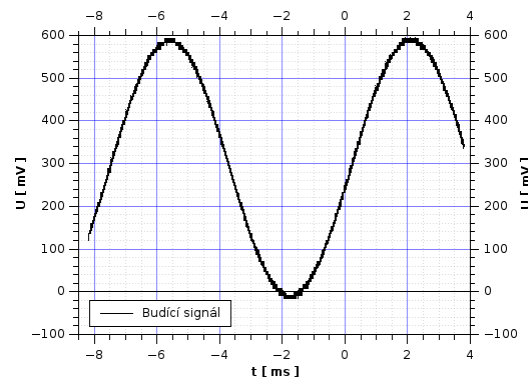


Obr. 17.- Blokové schéma uspořádání pro měření posuvu metodou self-mixing

Pozn.: vzdálenost $d = \sim 6\text{ cm}$, $l_1 = \sim 4,4\text{ cm}$ a $l_2 = \sim 1,6\text{ cm}$

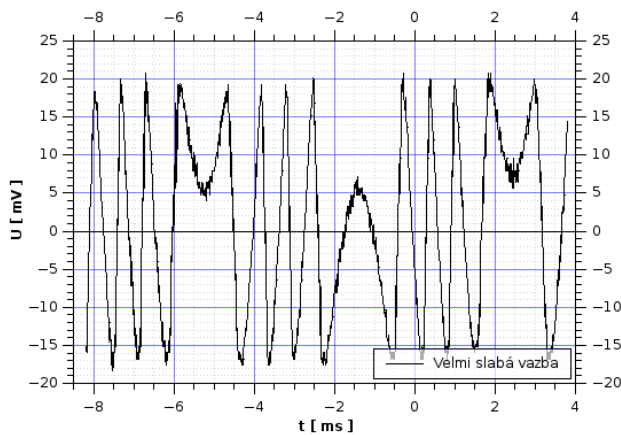
Gaussův svazek vystupující z laseru *LD* je kolimován přes čočku na *DUT*. To je tvořeno zrcátkem. Toto zrcátko je rozmítáno pomocí piezoposuvu buzeného budičem s generátorem funkcí ve směru šíření svazku. Odražený svazek putuje přes kolimační čočku zpět do dutiny laseru, kde interferuje. Tato interference je snímána detektorem, který je v laseru tvořen monitorovací fotodiódou. Monitorovací proud fotodiody I_{mon} si pro pozorování 'vytáhneme' přes svorku *J-11* budiče.

Jak již bylo zmíněno, k piezoposuvu je přiveden přes generátor a budič harmonický průběh - Obr. 18.

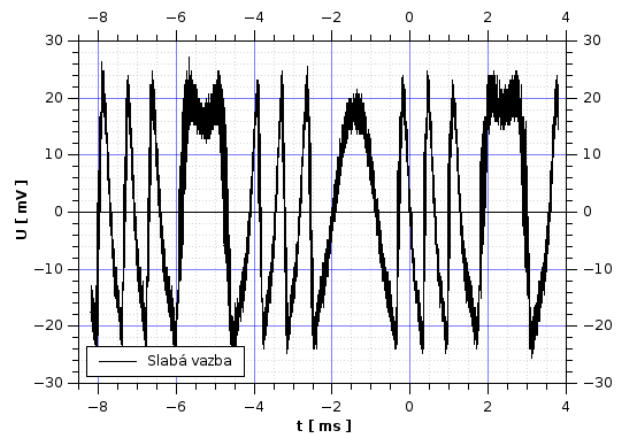


Obr. 18.- Budící signál piezoposuvu

Pomocí drobných doladění (převážně ze strany kolimační čočky) bylo dosaženo na stínítku osciloskopu pozorovatelné interference. Pomocí odklánění svazku mikrometrickým šroubem na úchyty zrcadla byl měněn parametr optické vazby C (Coupling). Nastavení vazebního režimu bylo pouze orientační, tedy na základě literatury [7].



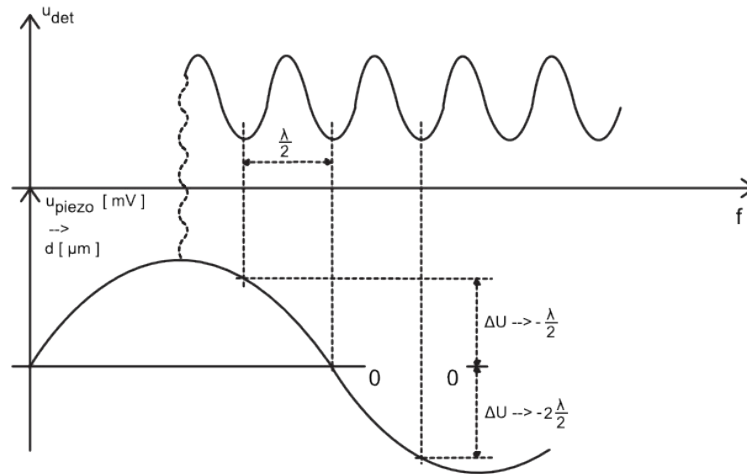
Obr. 19a.- Velmi slabá zpětná vazba



Obr. 19b.- Slabá zpětná vazba

3.3.1 Určení posuvu

Princip přepočtu budícího napětí harmonického průběhu na míru posunutí nejlépe znázorňuje Obr. 20.

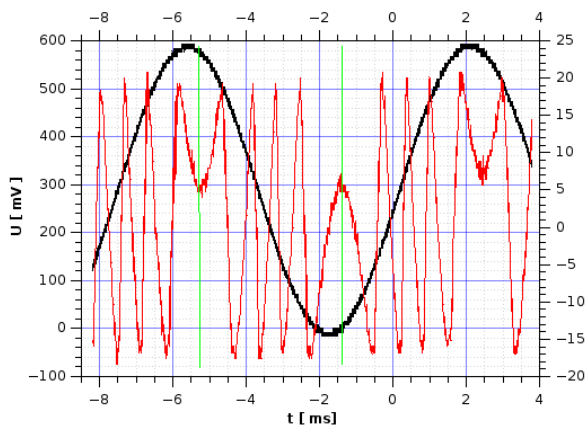


Obr. 20.- Určení posunutí pomocí interferenčních maxim

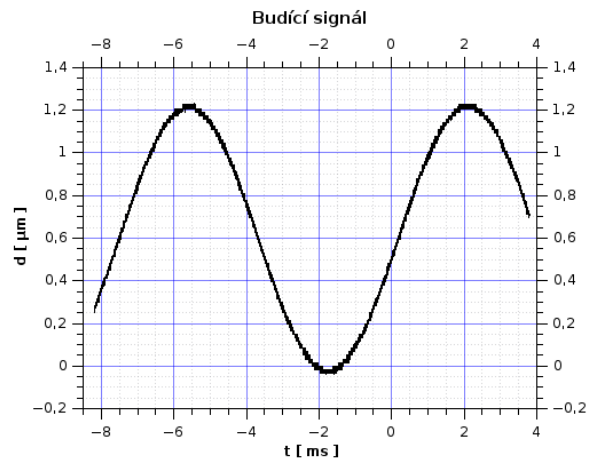
Obr. 20. se skládá ze dvou grafů. První (nahoře) je průběh interferenčního signálu, druhý (dole) je potom tvořen budícím signálem piezo-posuvu. Je známo, že posuv mezi dvěma maximy (minimy) je polovina vlnové délky λ . Stačí, aby bylo spočítáno, kolik se nachází interferenčních maxim (minim) mezi maximem a minimem budícího signálu. Pro výpočet použijeme následujícího vztahu:

$$d = n \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

Pro přepočet byla použita charakteristika v režimu velmi slabé optické vazby, protože měla nejmenší zkreslení vlivem 50 Hz sítě. Proložený graf je znázorněn na Obr. 21a., přepočítaný budící signál je potom na Obr. 21b.



Obr. 21a.- Grafy pro přepočet posuvu



Obr. 21b.- Vypočtená poloha zrcátka

Pozn.: Díky zeleným úsečkám v Obr. 21a., můžeme pozorovat hysterezi mezi interferenčním a budícím signálem. Současně vymezují prostor pro určení, kolikrát se změnila optická délka o 1λ , respektive $1/2 \lambda$ (kvůli odrazu od zrcadla).

Pozn.: Vzhledem k tomu, že jsme byli nuceni použít k buzení harmonický průběh napětí, nemůžeme aplikovat postup popsany výše v plné míře. Je si třeba uvědomit, že harmonický signál se nechová ve svých extrémech lineárně. Z tohoto důvodu byla nejprve vypočítána směrnice v okolí, kde se průběh chová téměř lineárně (tj. v okolí středu funkce). Dalším krokem bylo pomocí této směrnice přepočítat budící signál.

3.4 Měření otáček

Měření otáček se liší především v interpretaci naměřených dat. To znamená, že výsledky měření odečítáme ve frekvenční oblasti za použití spektrálního analyzátoru. Následkem rotace odrazného kotouče má zpětně navázaná vlna Dopplerův frekvenční posuv vůči dopadající vlně. Vztah mezi rychlostí a Dopplerovou změřenou frekvencí je následující: [8]

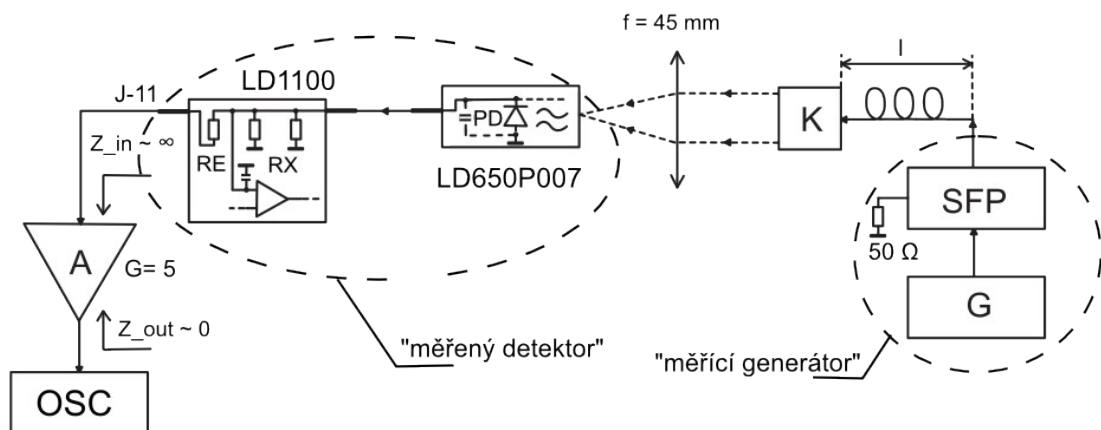
$$f_D = \frac{2v \cos(\theta)}{\lambda} \quad (11)$$

kde f_D je změřená Dopplerova frekvence, v je tečná rychlost otáčení, θ je úhel mezi vektorem tečné rychlosti a optickým svazkem, je λ je vlnová délka optické vlny.

Dále je měření o něco složitější především proto, že se zde začíná uplatňovat i konečná šířka pásma obvodu okolo fotodiody, kterou je potřeba určit (respektive změřit).

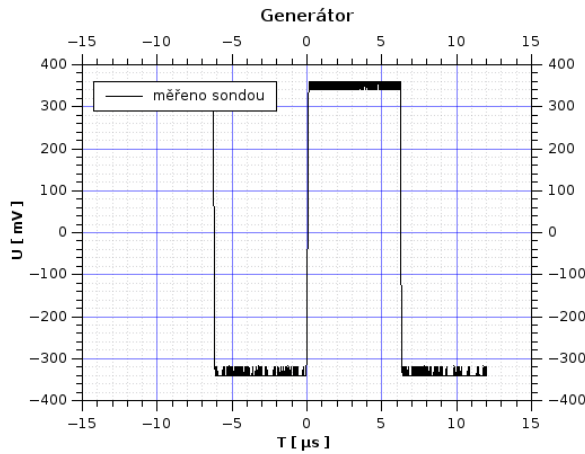
3.4.1 Měření šířky pásma obvodu fotodiody

Pro měření odezvy fotodiody bylo použito zapojení na Obr. 22. Tato odezva je dána především kapacitou přechodu. Výsledkem tohoto měření je tzv. frekvenční rozsah, ve kterém je schopna dioda pracovat jako detektor.

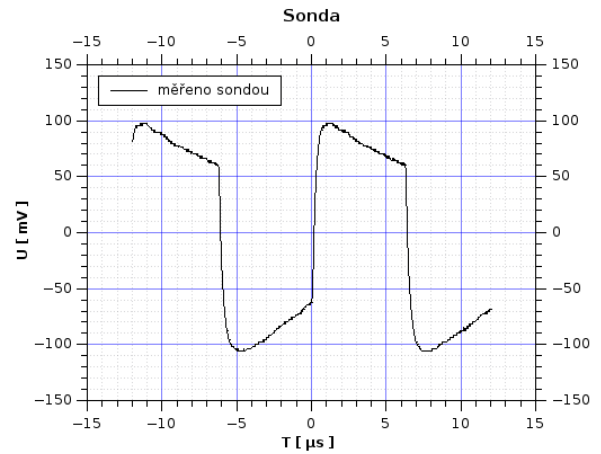


Obr. 22.- Blokové schéma uspořádání měření odezvy fotodiody

Obvod v okolí fotodiody (měřený detektor) má časovou konstantu. Tato konstanta omezuje šířku pásma fotodetektoru. K jejímu určení bylo použito měřicího generátoru, pomocí kterého sledujeme časovou konstantu detektoru. Měřicí generátor sestává z modulu *SFP*, kolimační optiky *K* a je buzen obdélníkovým signálem z generátoru funkcí *G*. Detekovaný signál je následně vytažen z budiče přes oddělovací zesilovač *A* na osciloskop *OSC*.



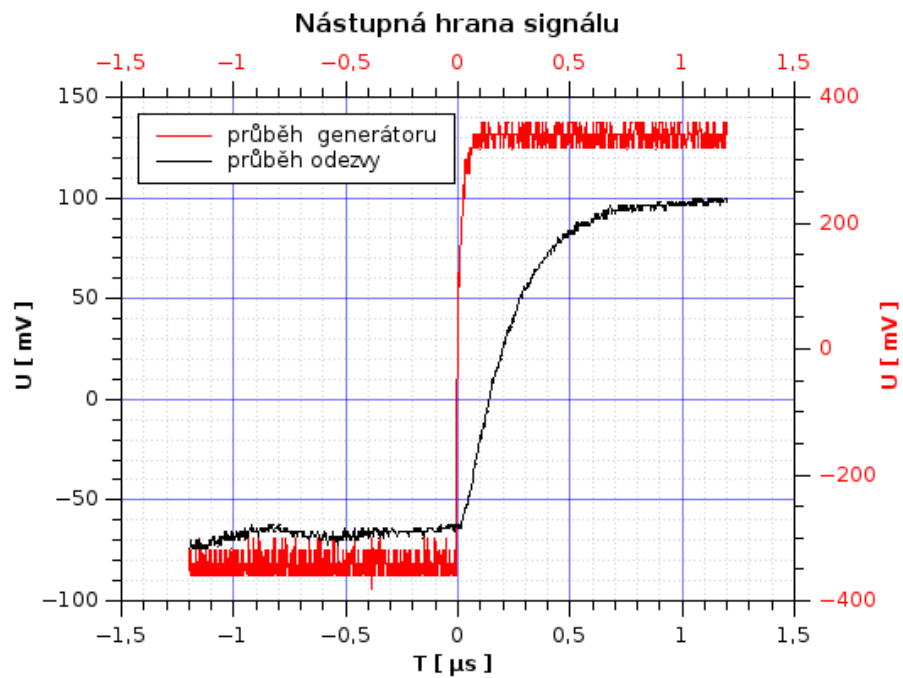
Obr. 23a.- Průběh napětí generátoru



Obr. 23b.- Průběh odezvy soustavy

Pozn.: Z Obr. 23b. jsou patrné exponenciální úbytky napětí v maximech, respektive minimech funkce. To je způsobeno kondenzátory, které jsou ve vnitřním obvodu modulu SFP.

Pro jednoznačné určení zlomové frekvence fotodiody je zapotřebí detailního průběhu nástupné hrany odezvy soustavy (viz. Obr. 24.).



Obr. 24.- Detailní pohled na nástupnou hranu průběhů

Změřená časová odezva činila 335 ns. Pro vzájemný přepočítání mezi časovou konstantou τ a zlomovou frekvencí lze napsat vztah:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (12)$$

Následující tabulka (1) obsahuje souhrnné výsledky měření odezvy soustavy zapojené v režimu *self-mixing*.

f_0	Budič	Fotodioda	Komentář:
< 10 Hz	oblast rychlé odezvy	oblast rovné odezvy	Nevhodné pro <i>self-mixing</i> : budič vyrovnává změny fotoproudu
< 10 Hz; 475kHz>	oblast snížené odezvy	oblast rovné odezvy	Vhodné pro <i>self-mixing</i>
> 475 kHz	oblast snížené odezvy	oblast klesající odezvy	Nevhodné pro <i>self-mixing</i> : klesající odezva fotodetektoru

Tabulka 1.- Souhrnná tabulka naměřených dat zlomových frekvencí

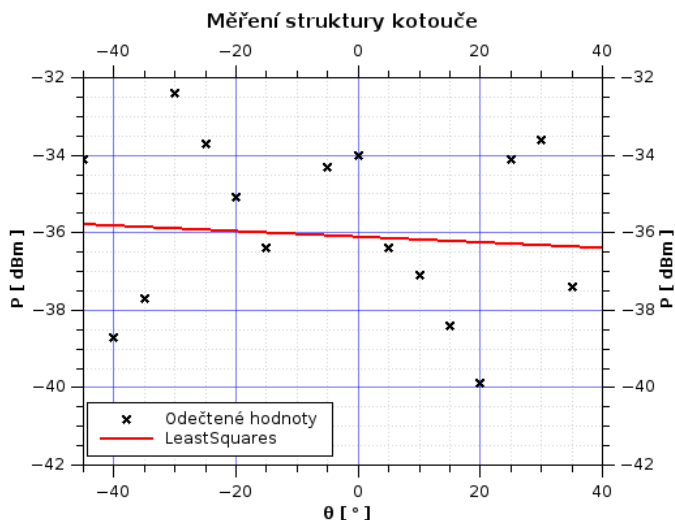
3.4.2 Výsledky měření

Pro demonstraci byly změřeny otáčky rotujícího kotouče. Na tomto kotouči byla nanášena nehomogenní struktura (v mikroskopickém měřítku). Díky tomu kotouč způsoboval všesměrový rozptyl. Obr. 25. demonstruje závislost odraženého výkonu od této struktury v závislosti na úhlu, pod kterým se odrážel.

Interferometr pro měření otáček byl sestaven dle blokového schématu na Obr. 26. Pro měření dopplerovských frekvencí byl použit spektrální analyzátor.

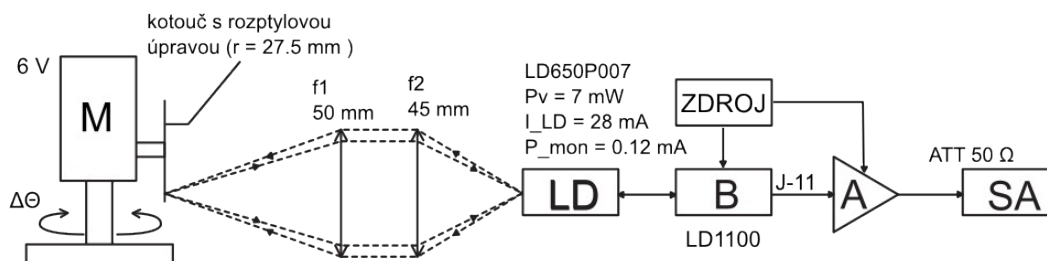
Pozn. Pokud bychom chtěli určit také směr otáček, muselo by měření přejít opět do časové oblasti. Tzn., že jsme schopni například pomocí osciloskopu na základě pozorovaných interferencí určit směr rotace.[8]

Úhlová závislost rozptylu materiálu na kotouči byla změřena a vynesena do grafu na Obr. 25.



Obr. 25.- Měření struktury povrchu kotouče

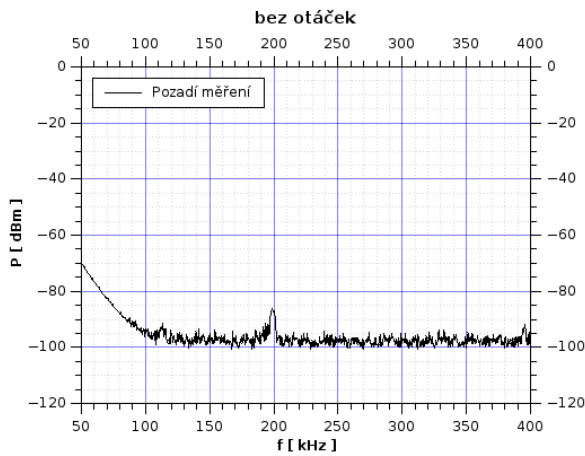
Pozn. Z grafu je patrné, že se výkon v závislosti na úhlu dopadu mění zanedbatelně a můžeme tak materiál prohlásit za všesměrově rozptylový.



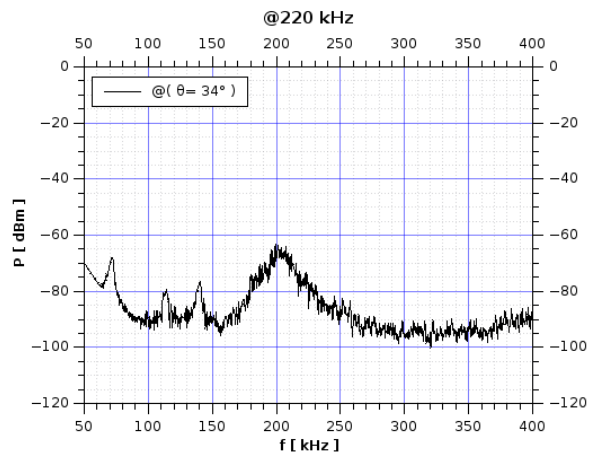
Obr. 26.- Uspořádání pro měření rychlostí

Motorek s převodovkou je umístěn na otočném stolku. Toto uspořádání umožňuje měnit úhel natočení kotouče o $\Delta\theta$. Optický svazek z laserové diody zaostříme přes soustavu dvou čoček (kolimační, fokusační) nejlépe na hranu kotouče (abychom měřili obvodovou rychlost). Od povrchu kotouče dojde k odrazu a tato odražená vlna (s dopplerovským posuvem) putuje zpět do LD, kde dochází k interferencím. Ty jsou snímány fotodiodou a přes zesilovač A zobrazovány na spektrálním analyzátoru. Cílem tohoto měření nebylo získat přesné údaje měření, ale demonstrovat, že je interferometr schopen měření rychlostí.

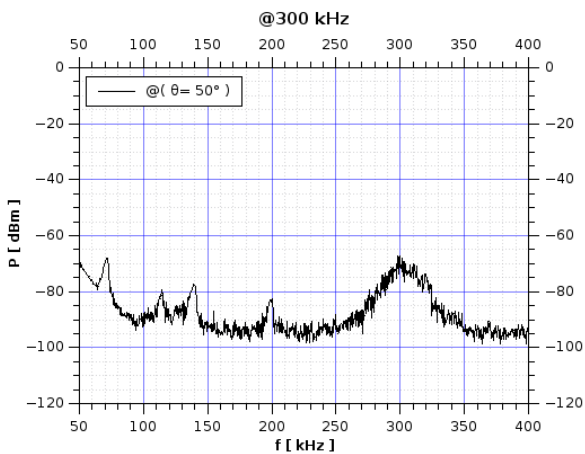
Obr. 27., 28. jsou výstupem měření pomocí této konfigurace.



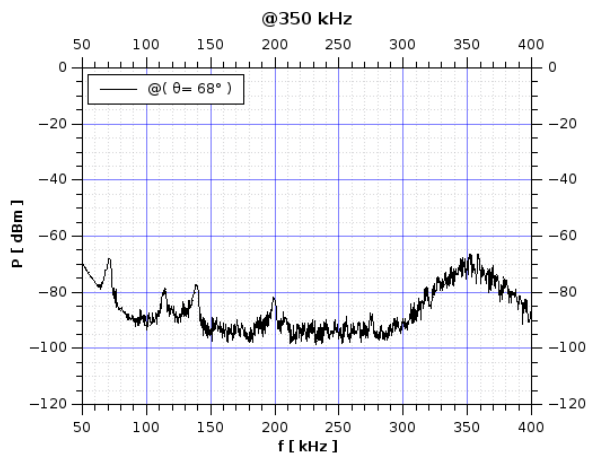
Obr. 27a.- Spektrum fotodetektoru bez signálu (tzv. pozadí)



Obr. 27b.- Dopplerovská frekvence 220 kHz



Obr. 27c.- Dopplerovská frekvence 300 kHz



Obr. 27d.- Dopplerovská frekvence 350 kHz

Ve spektru je jasně patrná čára odpovídající Dopplerově frekvenci. Tato čára je rozšířena především vlivem rotujícího kotouče, který vibroval. Nízká úroveň je způsobena tím, že spojení fotodiody a budiče není uzpůsobené pro snímání signálu fotodetektoru a určitě by jej bylo možné vylepšit navržením vlastního budiče, což přesahuje rámec práce...

4 Závěr

Cílem práce bylo demonstrovat teoretické předpoklady chování laserové diody zapojené v uspořádání *self-mixing* pro měření posuvů nebo otáček. Práce demonstruje dva různé interferometry. Naměřené výsledky odpovídaly teoretickým úvahám a měřením provedeným v článcích [7] [8]. Celý proces návrhu a měření těchto uspořádání doprovázela i doplňková měření jako jsou měření odezev budiče a fotodiody, rozptylovosti materiálu a spektrální šířky laseru, respektive koherentní délky. Během měření se ukázalo, že klíčovým bodem je náročnost na optické uspořádání. Experimenty by bylo možné dále vylepšit válcovou čočkou, která by snížila značnou elipticitu svazku z diody. Důležité je také zmínit problém koherentní délky. Bylo-li by požadováno měření na delší vzdálenosti, je zapotřebí jednoznačně použít vhodnější koherentní zdroj (mající dostatečnou koherentní délku). *Self-mixing* lze označit za konkurenta klasických interferometrů pro jeho jednoduchost a přesto pro mnoho aplikací dostatečnou citlivost.

Seznam použité literatury

- [1] Scalise L., Paone N.: *Laser Doppler vibrometry based on self-mixing effect*, Optics and Lasers in Engineering, Ancona, Italy 2002, ISBN: 01438166
- [2] Hui R., O'Sullivan M.: *Fiber Optic Measurement Techniques*, Elsevier Academic Press, 2009, ISBN: 978-0-12-373865-3
- [3] Harry J., Dutton R.: *Understanding optical communications*, IBM Corporation, USA 1998, URL: <http://www.redbooks.ibm.cz> < cit. 15.5.2015 >
- [4] Novotný K.: *Optické komunikační systémy*, CVUT Praha, Praha 2002, ISBN: 80-01-01642-0
- [5] Lukáš M.: *Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod*, PrF UP Olomouc, 2001, URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html> < cit. 15.5.2015 >
- [6] Ryan A. T., Agrawal G. P., Gray G. R., Gage E. C.: *Optical-feedback-induced chaos and its control in multimode semiconductor lasers*, IEEE, 1994, ISBN: 0018-9197
- [7] Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T.: *Laser diode self-mixing technique for sensing applications*, Journal of Optics, UK 2002, ISBN: 1464-4258
- [8] Scalise L., Yu Y., Giuliani G., Plantier G., Bosch T.: *Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement*, IEEE, 2004, ISBN: 00189456

Zkratka	Význam	Přístroj
B	Budič (posuvu)	THORLABS MDT 693A
BUDIČ	Budič (laser.)	THORLABS LD1100
D	Detektor	THORLABS LMR1/M
G	Generátor	RHODE SCHWARTZ HMF 2550
LD	Laserová dioda	L650P007
M	Motor	RASEL GM8A (70ot./min při 5 V)
OSC	Osciloskop	AGILENT TECHNOLOGIES DS03102H
PP	Piezo-posuv	MAX 373 D/M
ZDROJ	Zdroj napětí	GW INSTEK GPD-33036

Název	Funkce
CadSoft Eagle	Editor návrhu plošných spojů
Gimp	Bitmapový grafický editor
Inkscape	Vektorový editor
LibreOffice Calc	Tabulkový procesor
LibreOffice Writer	Textový editor
Okular	PDF prohlížeč a editor
QtiPlot	Software pro vytváření grafů a analýzu dat
Zoner Calisto 5	Vektorový editor

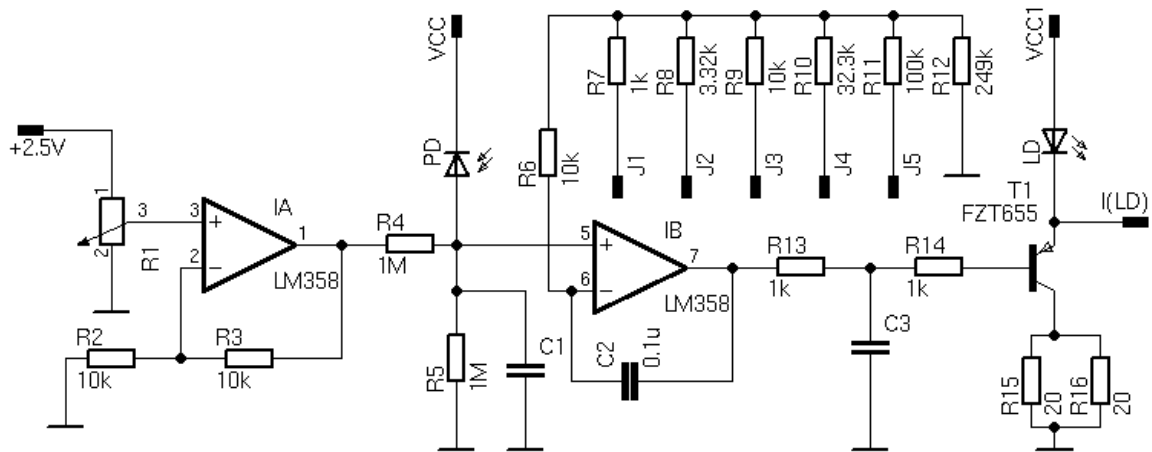


Schéma budiče LD1100

Stručný popis:

Referenční hladinu napětí 2,5 V přivedenou k trimru *R1* zajišťuje integrovaný obvod *LM336*. Budič porovnává nastavený proud (ten je odvozen z napěťové reference) s fotoproudem. Proud lze volitelně nastavovat pomocí kombinace rezistorů (*RA, RB, RC, RD, RE*), jež pomocí zkratového můstku propojíme se zemí budiče. Pro jemné doladění potom slouží trimr.

LD1100

Chapter 9 Specifications

Performance Specifications	
Operating Mode	Constant-Power (Photodiode Feedback)
Output Current	0 – 250 mA
Output Control	12-Turn Potentiometer (On-Board)
Output Stability	<0.01%
Output Noise	0.1 μ A (RMS)
Feedback Gain	On-Board, Pin-Programmable, Also Externally Configurable
Monitor Current Range	5 μ A – 5 mA
Operating Voltage	8 to 12 VDC
Quiescent Current	9 mA
Dimensions	1" x 1.5", 12 Pin SIP Package
ESD Protection	100 ms Slow Start

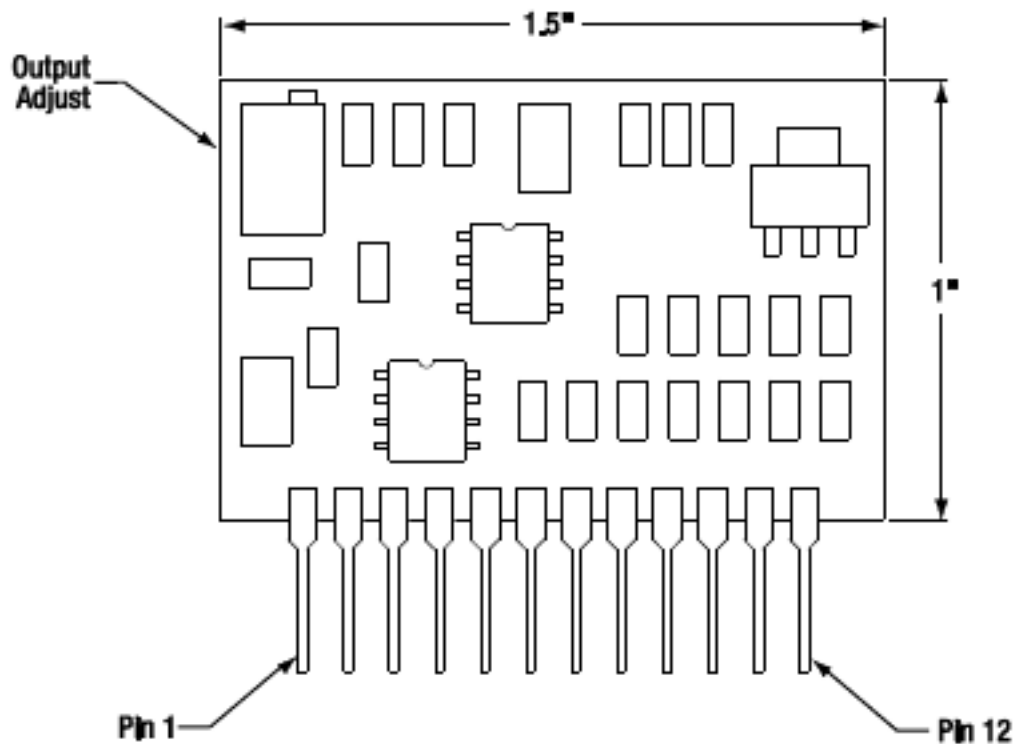


Figure 6 LD1100 Pinouts

Pin	Signal	Description
1	+V	Circuit Power, 8 to 12VDC, 250mA. NOTE: Internally tied to Laser Diode Anode, the laser anode must be isolated from the power supply COM.
2	COM	Circuit ground
3	V _{REF}	Internal 2.5 V reference
4	PDA	Photodiode Anode
5	LDA	Laser Diode Anode [internally tied to +V (pin 1)]
6	LDC	Laser Diode Cathode
7	RA	When tied to common puts a 100 k Ω in parallel with 249 k Ω internal gain res.
8	RB	When tied to common puts a 33.2 k Ω in parallel with 249 k Ω internal gain res.
9	RC	When tied to common puts a 10 k Ω in parallel with 249 k Ω internal gain res.
10	RD	When tied to common puts a 3.32 k Ω in parallel with 249 k Ω internal gain res.
11	RE	When tied to common puts a 1 k Ω in parallel with 249 k Ω internal gain res.
12	I _{LD}	Laser Diode Current Monitor (10 mV/mA)

Max I_{mon} (mA)	RA 100 k Ω	RB 33 k Ω	RC 10 k Ω	RD 3.3 k Ω	RE 1 k Ω
0.010	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
0.035	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
0.085	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
0.110	ON	ON	OFF	OFF	OFF
0.260	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
0.285	ON	OFF	ON	OFF	OFF
0.335	OFF	ON	ON	OFF	OFF
0.360	ON	ON	ON	OFF	OFF
0.767	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
0.792	ON	OFF	OFF	ON	OFF
0.843	OFF	ON	OFF	ON	OFF
0.868	ON	ON	OFF	ON	OFF
1.017	OFF	OFF	ON	ON	OFF
1.042	ON	OFF	ON	ON	OFF
1.093	OFF	ON	ON	ON	OFF
1.118	ON	ON	ON	ON	OFF
2.510	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
2.535	ON	OFF	OFF	OFF	ON
2.585	OFF	ON	OFF	OFF	ON
2.610	ON	ON	OFF	OFF	ON
2.760	OFF	OFF	ON	OFF	ON
2.785	ON	OFF	ON	OFF	ON
2.835	OFF	ON	ON	OFF	ON
2.860	ON	ON	ON	OFF	ON
3.267	OFF	OFF	OFF	ON	ON
3.292	ON	OFF	OFF	ON	ON
3.343	OFF	ON	OFF	ON	ON
3.368	ON	ON	OFF	ON	ON
3.517	OFF	OFF	ON	ON	ON
3.542	ON	OFF	ON	ON	ON
3.593	OFF	ON	ON	ON	ON
3.62	ON	ON	ON	ON	ON

Figure 3 Feedback Gain Resistor Settings

Product Specification Sheet

Laser Diode

Description

Thorlabs Ø5.6 mm, TO-18 can package discrete laser diode is a compact light source suited to many applications. Our lasers are fully compatible with our entire line of Laser Diode and TEC Controllers as well as our selection of Laser Diode Mounts and Collimation Solutions.

Specifications

($P_o = 7 \text{ mW}$, $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Specification	Symbol	Max
LD Reverse Voltage, V	$V_{R(LD)}$	2
PD Reverse Voltage, V	$V_{R(PD)}$	30
Operation Case Temperature, $^\circ\text{C}$	T_{op}	-10 to 70
Storage Temperature, $^\circ\text{C}$	T_{STG}	-40 to 85

L650P007

Specification	Symbol	Min	Typ	Max
Wavelength, nm	λ_p	640	650	660
Output Power, mW	P_o	-	7	10
Threshold Current, mA	I_{th}	-	20	25
Operation Current, mA	I_{op}	-	28	35
Operating Voltage, V	V_{op}	-	2.2	2.6
Beam Divergence, deg	θ_0	5	9	12
	θ_{\perp}	24	28	32
Slope Efficiency, mW/mA	η	0.6	1	1.3
Monitor Current, mA	I_m	-	0.12	0.3
Astigmatism, μm	A_s	-	-	15
Beam Angle Deviation, deg	θ_y	-3	-	3
	θ_x	-3	-	3
Emission Point Accuracy, μm	ΔX	-80		80
	ΔY	-80		80
	ΔZ	-80		80

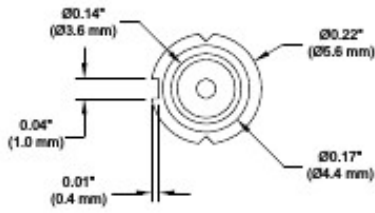
L650P007 Normalized Output Power

21034-903 Rev A - April 1, 2010
Specifications subject to change without notice

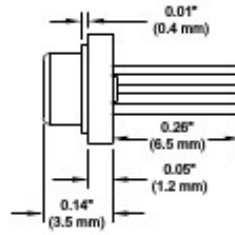
Drawings



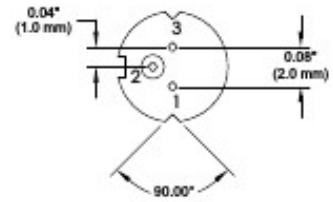
Top View



Side View



Bottom View



Pin Code SA



Pin Description

- 1 Laser Cathode
- 2 Case Common
- 3 Monitor Diode Anode

USA, Canada, and South America

Thorlabs, Inc.
435 Route 286
Norwalk, NJ 07160, USA
Tel: 973-578-7227
Fax: 973-380-3680

Europe

Thorlabs GmbH
85221 Dachau, Germany
Tel: +49-08131-956-0

Scandinavia

Thorlabs Sweden AB
800 20 Göteborg, Sweden
Tel: +46-31-733-3049

UK and Ireland

Thorlabs LTD
Crowthorne RG7 4EX, GB
Tel: +44 (0)1351-654440

Japan and Asia

Thorlabs Japan Inc.
Bunkyo-ku, Tokyo 112-0812, Japan
Tel: +81-3-5679-8089

France

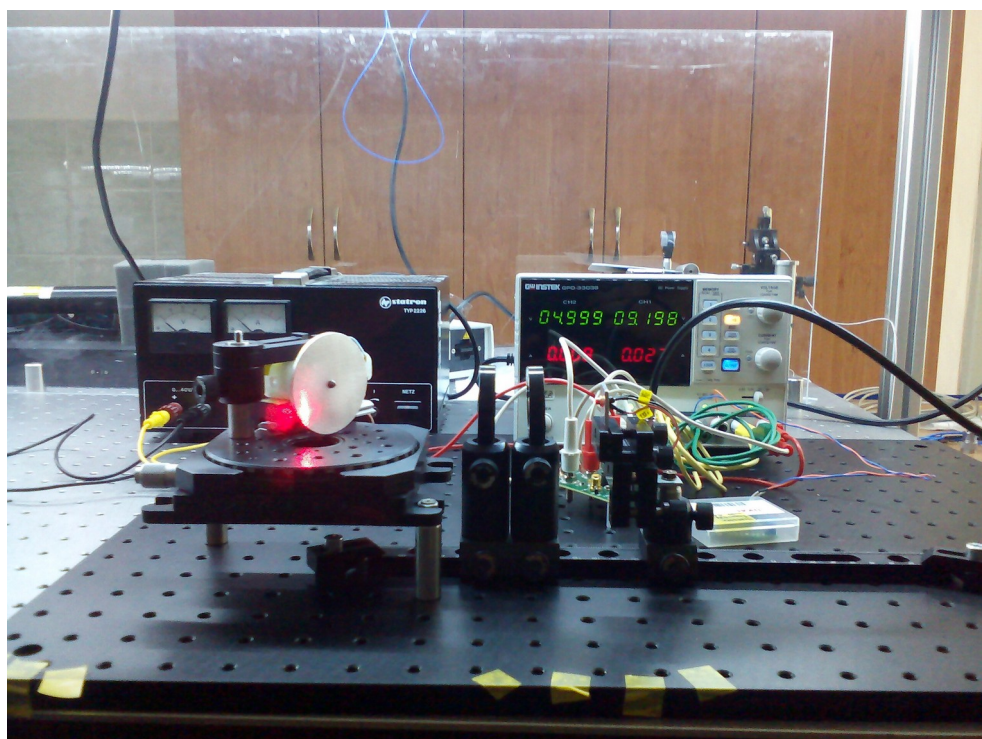
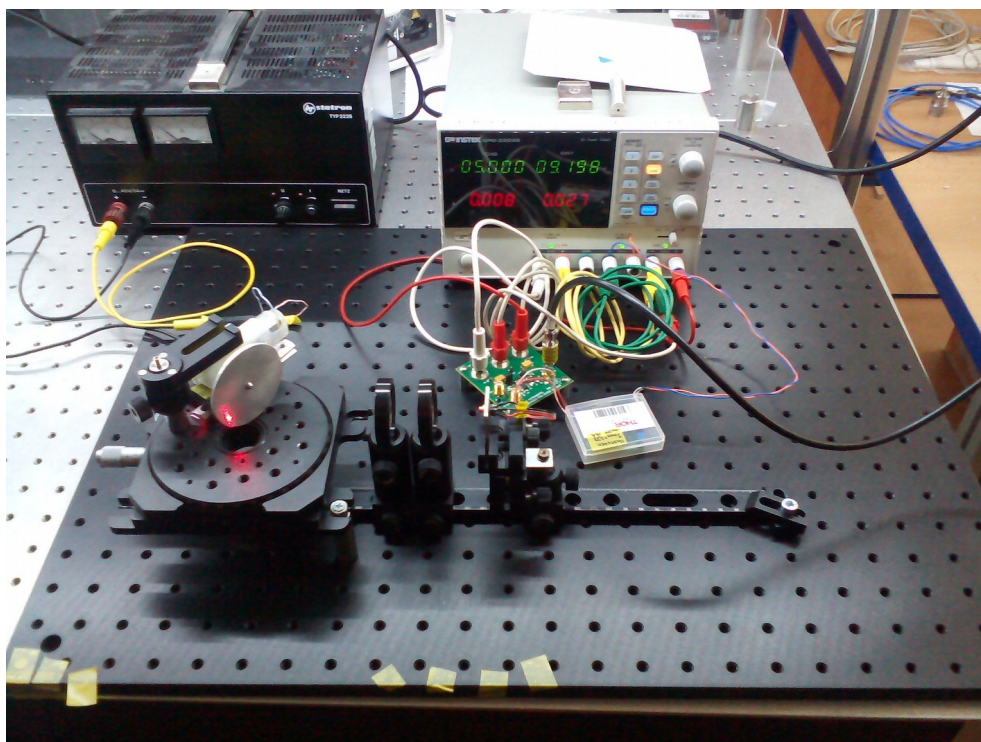
Thorlabs SAS
78080 Maurel-LaFite, France
Tel: +33 (0)970 444 844

China

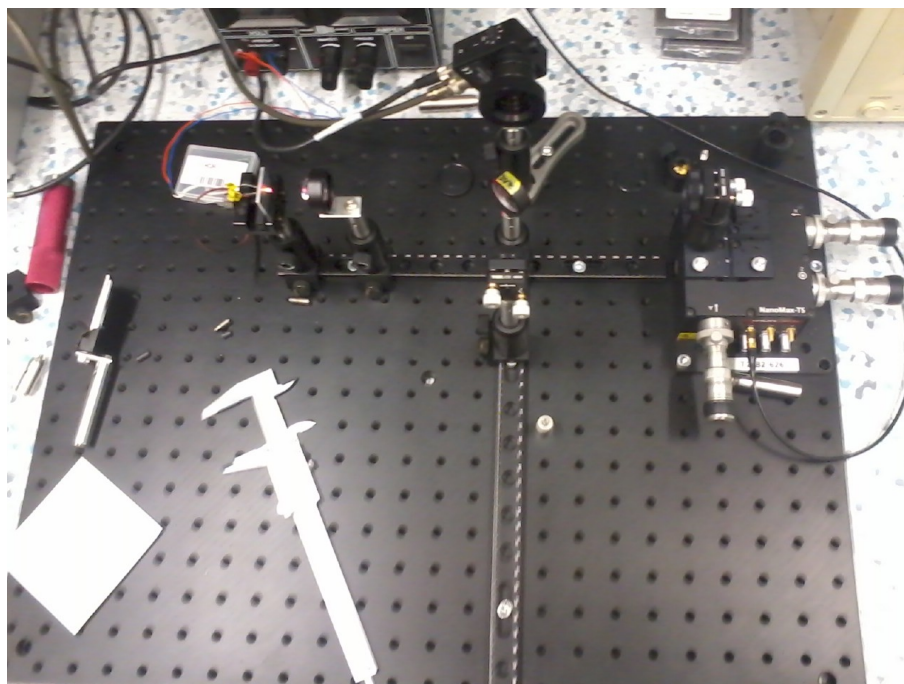
Thorlabs China
Shanghai, China
Tel: +86 (021) 32513486



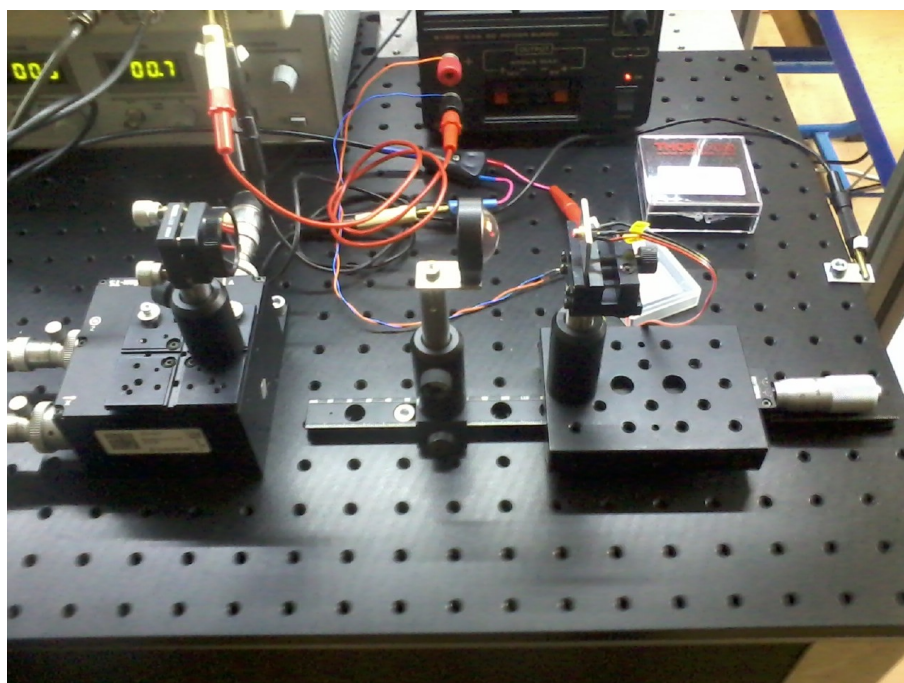
21024-500Rev A - April 1, 2010
Specifications subject to change without notice



Měření otáček



Měření koherentní délky



Měření změn polohy