

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optoelektronická zpětná vazba

Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: **Walter EINAIGL**
Osobní číslo: **R17305**
Adresa: **Paseka 264, Paseka, 78397 Paseka u Šternberka, Česká republika**
Téma práce: **optoelektronická zpětná vazba**
Téma práce anglicky: **optoelectronic feedback**
Vedoucí práce: **RNDr. František Petráš**
Katedra optiky

Zásady pro vypracování:

Tématem zadání diplomové práce je zpracovat a vysvětlit obecnou představu pojmu optoelektronická zpětná vazba. Případně navrhnout a zrealizovat vhodný vybraný experiment pro ověření jejího principu a využití.

Seznam doporučené literatury:

Quantum electronics, AMNON YARIV
Optické vláknové senzory, STANISLAV PETRÍK, JÁN TURÁN
Optické, elektrodynamické a nelineární vlastnosti optických vláken, VÁCLAV SOCHOR

Podpis vedoucího práce:

Datum:

Podpis vedoucího pracoviště:

Datum:

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Optoelektronická zpětná vazba“ vypracoval samostatně pod vedením **RNDr. Františka Petráše** a s použitím uvedené literatury a pramenů.

Poděkování

Rád bych poděkoval **RNDr. Františku Petrášovi** za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

V Olomouci, dne 10. 06. 2020

.....

podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním a vysvětlením obecné představy pojmu optoelektronická zpětná vazba. Na základě teoretických předpokladů je navržen, sestaven a odladěn experiment oscilačního senzoru s optoelektronickou zpětnou vazbou. Jako senzor slouží cívka optického vlákna, do které je navázán laserový paprsek. Elektronickou část senzoru tvoří obvod astabilního multivibrátoru s operačním zesilovačem, k jehož výstupu je připojen člen frekvenčního rozdílu a zobrazení hodnoty je na displeji frekvenčního čítače.

Annotation

This bachelor's thesis deals with the elaboration and explanation of the general idea of the concept of optoelectronic feedback. Based on theoretical premise, an experiment of an oscillation sensor with optoelectronic feedback is designed, assembled and debugged. As a sensor is coil of optical fiber. Into optical fibre is connected laser beam. The electronic part of the sensor the circuit of an astable multivibrator with an operational amplifier, to the output of this circuit is connected frequency difference circuit and the value is displayed on the display of the frequency counter.

Obsah

ÚVOD.....	8
1 PRVNÍ KAPITOLA – TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY	9
1.1.1 Základní výhody optických vláknových senzorů:	9
1.1.2 Dělení OVS.....	9
1.1.3 Amplitudové optické vláknové senzory	11
1.1.4 Fázové optické vláknové senzory.....	12
1.1.5 Polarizační optické vláknové senzory	12
1.2 OPERAČNÍ ZESILOVAČ.....	12
1.2.1 Ideální operační zesilovač se vyznačuje:.....	12
1.2.2 Reálný operační zesilovač má:.....	13
1.3 ZPĚTNÁ VAZBA	14
1.3.1 Dělení zpětných vazeb	15
1.3.2 Kladná zpětná vazba	16
1.3.3 Záporná zpětná vazba	17
1.4 OPTICKÁ ZPĚTNÁ VAZBA	19
1.5 LASER	19
1.5.1 Stimulovaná absorpce záření	19
1.5.2 Inverzní populace hladin.....	20
1.5.3 Spontánní emise záření	20
1.5.4 Stimulovaná emise záření.....	21
1.6 POLOVODIČOVÉ LASERY.....	21
1.7 OPTICKÉ VLÁKNO	24
1.7.1 Jednovidové optické vlákno.....	24
1.7.2 Mnohovidové optické vlákno.....	25
2 DRUHÁ KAPITOLA – EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
2.1 SENZOR S OPTOELEKTRONICKOU ZPĚTNOU VAZBOU.....	26
2.1.1 Spektrální analýza	29
2.1.2 Fototranzistor.....	30
2.2 OPTOELEKTRONICKÁ ZPĚTNÁ VAZBA.....	33
2.3 MONITOROVÁNÍ VÝSTUPNÍ FREKVENCE.....	35
2.4 FREKVENČNÍ ETALON S NE555 A S KRYSTALEM	37
2.5 OBVOD FREKVENČNÍHO ROZDÍLU	39
2.6 MOŽNOSTI ZKRÁCENÍ DÉLKY PULZU	45
2.6.1 Laserový driver	45

2.6.2	<i>Derivační RC článek</i>	45
2.6.3	<i>Zpoždění na logických hradlech</i>	46
2.6.4	<i>Zkrácení pomocí Lenzova zákona</i>	47
2.7	OSCILAČNÍ OPTOELEKTRONICKÝ SENZOR V PULZNÍM REŽIMU	48
ZÁVĚR		52
LITERATURA		53
SEZNAM OBRÁZKŮ A FOTOGRAFIÍ		56
SEZNAM PŘÍLOH		59

Seznam zkratek a značek

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

OVS – Optické vláknové senzory

GaAs – Gallium Arsenide

CO₂ – Oxid uhličitý

Nd-YAG – Neodim yag

He-Ne – Helium neon

LED – Light-Emitting Diode

VACH – Volt ampérová charakteristika

H – High (vysoká úroveň)

Úvod

Tématem zadání této bakalářské práce je optoelektronická zpětná vazba a její aplikace. Rozhodl jsem se osvětlit tuto problematiku a současně sestavit experiment s vybranou aplikací oscilačního optoelektronického vláknového senzoru.

Optické vláknové senzory představují současnou moderní kategorii optoelektroniky pro přesnější snímání nejrůznějších fyzikálních veličin. Je možné vytvořit mnoho jednodušších i složitějších modifikací. S nadsázkou se nebojím říci, že není disciplína ve fyzice, chemii i biologii, kde by tento typ senzorů nenašel své uplatnění. Výhoda oproti konvenčním snímačům je větší citlivost, variabilita a bezpečnost ve specifických prostředích. Využití těchto senzorů najdeme tedy v laboratořích, zdravotnictví a průmyslu.

V teoretické části se budu věnovat rozdělení a popisu optických vláknových senzorů, zmíním jejich rozdělení výhody i nevýhody. Dále se budu věnovat operačnímu zesilovači, problematice zpětné vazby jejímu použití a rozdělení, popisu optoelektronické zpětné vazby, vzniku optického záření, laserovým diodám a optickému vláknu.

V praktické části je vysvětlena konstrukce a podstata experimentu a současně způsob měření včetně základních parametrů změřených na zrealizovaném zapojení. V závěru zhodnotím dosažení a návrh další možné modifikace konstrukce senzoru pracujícího v pulzním režimu.

1 První kapitola – Teoretická část

1.1 Optické vláknové senzory

Vláknové senzory se používají pro vyhodnocení působení fyzikální veličiny na optické vlákno. Dnes existují optické vláknové senzory pro měření všech fyzikálních jevů, jako je změna teploty, změny tlaku, otočení, vibrace, elektrického pole, magnetického pole, navigace, akcelerace, posuvu, měření záření nebo například koncentrace oleje v kapalině. I přes jejich vysokou citlivost a jednoduchost se oproti původním předpokladům optické vláknové senzory masově nerozšířily. Může za to nejspíše skutečnost, že o nich veřejnost příliš neví a raději používají konvenční klasické snímače. Optické vláknové senzory samozřejmě mají větší složitost konstrukce a pořizovací cenu. I přesto optické vláknové senzory jsou nenahraditelné, protože i nejlepší konvenční snímače nedosahují takových parametrů jako právě optické vláknové senzory. Nenahraditelné jsou například u optických gyroskopů nebo třeba hydrofonů.

[1]

1.1.1 Základní výhody optických vláknových senzorů:

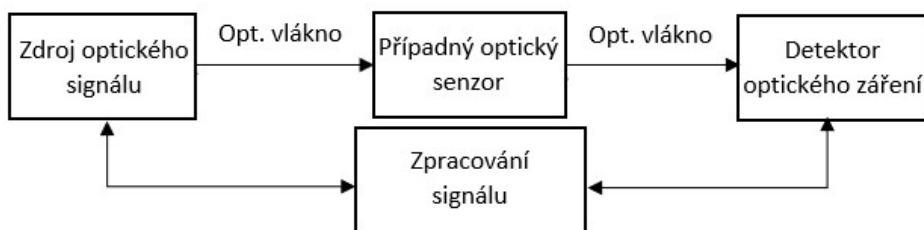
- Vysoká citlivost
- Odolnost proti vnějšímu elektromagnetickému rušení
- Nízká spotřeba elektrické energie
- Možnost použití ve výbušném, hořlavém nebo snadno zápalném prostředí
- Odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí
- Malé rozměry a nízká hmotnost

1.1.2 Dělení OVS

Optické vláknové senzory z pohledu konstrukce dělíme na dva typy:

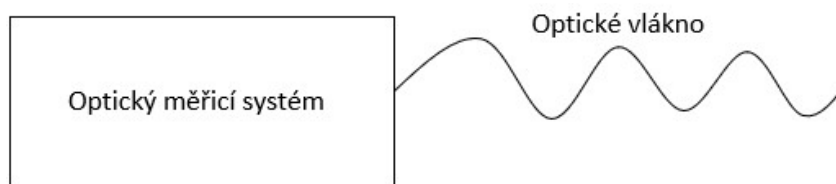
- První typ optického vláknového senzoru má na jednom zakončení optického vlákna zdroj elektromagnetického záření a na druhém zakončení má detektor elektromagnetického záření. Měřená fyzikální veličina přímo působí na parametry elektromagnetického záření procházejícího optickým vláknem, nebo optické vlákno představuje pouze přenosovou cestu a nachází se na něm optický senzor. Parametry elektromagnetického záření máme na mysli amplitudu záření, polarizaci a fázi. U tohoto

typu konstrukce musí být rovněž elektronický vyhodnocovací systém a možnost zobrazení měřených hodnot. Tento typ snímače je bodový, protože se na optickém vlákně nachází optický senzor a jen na něj působí změna. Popřípadě měříme celkové působení na celou délku optického vlákna a tuto změnu vyhodnocujeme.



Obr. 1: Principiální schéma zapojení prvního typu OVS

- Druhý typ optického vláknového senzoru využívá zpětného odrazu elektromagnetického záření, ke kterému dochází v optickém vlákně, a proto se nachází na jednom zakončení optického vlákna zdroj i detektor elektromagnetického záření nejčastěji formou nějakého měřicího systému. U tohoto uspořádání se využívá zpětných rozptylů optického vlákna, v důsledku Rayleighova rozptylu, Ramanova rozptylu a Brillouinova rozptylu. S oblibou se zde využívá metoda měření pomocí OTDR systému. Tento druh vláknového senzoru se používá pro měření fyzikálních vlivů, ke kterým dochází v průběhu celé dráhy optického vlákna, a zároveň i měření fyzikálních veličin na jednotlivých bodech dráhy.



Obr. 2: Principiální schéma druhého typu OVS

Dělení optických vláknových senzorů podle konstrukce:

Vlastní optické vláknové snímače – fyzikální veličina přímo ovlivňuje vlastnosti záření šířící se optickým vláknem.

Nevlastní optické vláknové snímače – optické vlákno je zde pouze jako zprostředkovatel přenosu informace světla a fyzikální veličina působí na externí snímač umístěný na optickém vlákně.

Dělení optických vláknových senzorů podle počtu snímaných bodů:

Bodové snímače – měří se vliv senzoru nevlastního OVS nebo optické vlákno bereme jako celek a vyhodnocujeme změnu na celé délce optického vlákna.

Distribuované snímače – měří se na několika bodech na vlákně a zobrazuje se křivka změn.

Dělení optických vláknových senzorů podle vyhodnocení a snímané veličiny:

- OVS s mechanickým působením – tlak, vibrace, posuv, otočení
- OVS s tepelným působením – změna teploty
- OVS s elektromagnetickým působením – změny, povaha elektromagnetického pole
- OVS s radiačním působením – měření intenzity radiace, rentgenového záření
- OVS s chemickým působením – měření koncentrace směsí
- OVS s biologickým působením – okysličení tkáně, průtok krve, identifikace DNA

Dělení optických vláknových senzorů podle snímaného parametru světelného záření:

- Amplitudové optické vláknové senzory
- Fázové optické vláknové senzory
- Polarizační optické vláknové senzory

1.1.3 Amplitudové optické vláknové senzory

Amplitudové optické vláknové senzory jsou zřejmě nejrozšířenější a nejjednodušší konstrukce. Využívají také nelineární jevy optických vláken, například stimulovaný rozptyl, jako Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl, které mění intenzitu záření procházející optickým vláknem. Existují i speciální optická vlákna, která svým složením zvyšují reakci na daný podnět. Konstrukce těchto vláken je ovlivněna příměsí vzácných zemin, nebo je vlákno povrstveno feromagnetickým materiálem (případně pokoveno), upraveno například pro detekci γ záření. Nejčastější vliv na změnu intenzity má vliv mikroohybů optického vlákna.

– měří se změna amplitudy záření

1.1.4 Fázové optické vláknové senzory

Tyto vláknové senzory jsou nejpřesnější, ale také nejsložitější. Využívá se zde změny fáze referenční vlny a měřicí vlny. Tato změna se vyhodnocuje pomocí interferometrického měření. Fáze elektromagnetické vlny se mění s délkou optického vlákna, se změnou indexu lomu nebo se změnou průměru optického vlákna.

– měří se fázový rozdíl mezi referenčním a měřicím ramenem pomocí interferometrického měření, typickým použitím je měření mikro posuvu

1.1.5 Polarizační optické vláknové senzory

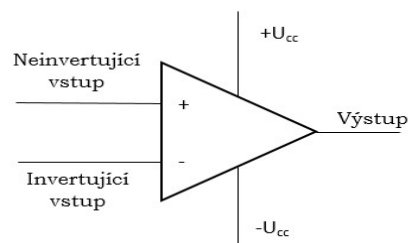
Tyto vláknové senzory jsou speciální skupinou určenou pro měření stočení roviny polarizace elektromagnetické vlny a které vyhodnocují dodatečný dvojlom v prostředí optického vlákna. Polarizační senzory využívají například fyzikální jev, jako například Faradayův jev, Kerrův jev a Pockelsonův jev. Měří se parametry vlny vstupující do vlákna a parametry vlny vystupující z optického vlákna. Snímaná fyzikální veličina může být například magnetické pole.

– měří se změna polarizačního stavu světla po průchodu vláknem. Typickým použitím je měření elektromagnetického pole ve dvou polarizačních stavech Wollastonovým hranolem. [1]

1.2 Operační zesilovač

1.2.1 Ideální operační zesilovač se vyznačuje:

- Nekonečným napěťovým zesílením
- Nekonečným vstupním odporem
- Nulovým výstupním odporem
- Nekonečnou šířkou přenášeného pásma
- Nulovým šumem



Obr. 3: Schématická značka operačního zesilovače

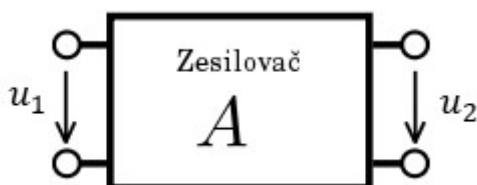
1.2.2 Reálný operační zesilovač má:

- Velké napěťové zesílení cca 10 000x až 1 000 000x
- Velký vstupní odpor řádově $M\Omega$ až $G\Omega$
- Nenulový výstupní odpor
- Omezenou šířku přenášeného pásma
- Nenulový šum

První operační zesilovače se začaly vyrábět na konci 60. let 20. století. Byly vyvinuty pro realizaci matematických operací pro analogové počítače. První operační zesilovače byly sestaveny z elektronek, ale z důvodu spotřeby elektrické energie a potřeby odvádění množství tepla se přešlo k integrovaným verzím tvořeným tranzistory. Pro nízkou cenu a dobrou přizpůsobivost obvodu pro různé účely se obvod stal velice oblíbeným a největší využití našel v laboratořích a v průmyslovém odvětví. Reálný obvod operační sítě (operační síť je zapojení operačního zesilovače s dalšími funkčními bloky) je tvořen čtyřmi částmi. První část je samotný operační zesilovač, druhou částí je napájecí zdroj, třetí částí je zpětnovazební obvod a zátěž. Vstupní napájecí napětí nemusí být symetrické, ale většina operačních zesilovačů jej vyžaduje. Vstupní veličina obvodu je napájecí napětí u_1 nebo vstupní proud i_1 zdroje signálu a výstupní veličinou je napětí u_2 nebo proud i_2 na svorkách zátěže. Zesílení operačního zesilovače se dá nastavit pomocí zpětné vazby. Princip operačního zesilovače je poměrně jednoduchý, porovnává vstupní napětí na invertujícím vstupu a na neinvertujícím vstupu a snaží se upravit hodnotu výstupního napětí tak, aby byl rozdíl mezi oběma vstupy nulový.

Pro zesílení (A) operačního zesilovače se používá vzorec:

$$A = \frac{u_2}{u_1}$$



Obr. 4: Znázornění operačního zesilovače jako dvojbranu

1.3 Zpětná vazba

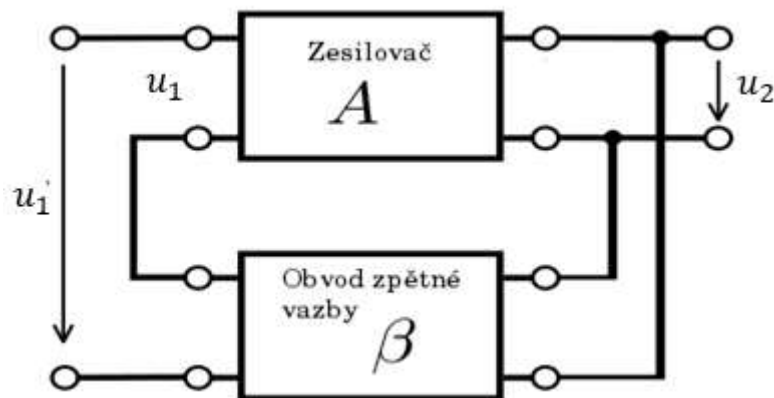
První automatická zpětná vazba u přístrojů byla nejspíš použita v parním stroji pro regulaci otáček. Ale její největší využití je ale v elektrotechnice v odvětví automatizace pro samočinné udržování regulované veličiny podle daných podmínek a hodnot.

Operační zesilovač, i zpětnou vazbu lze chápat jako dvojbran. Základem každého zapojení operačního zesilovače je zpětná vazba. Zesílení operačního zesilovače označujeme jako „ A “ a zesílení zpětné vazby označujeme jako „ β “. Zpětná vazba odebírá část výstupního signálu a ten se vrací zpět na vstup. U zpětné vazby se nastavuje parametr zesílení. $U_{diferenční}$ je napěťový rozdíl invertujícího a neinvertujícího vstupu operačního zesilovače.

Pro zesílení zpětné vazby operačního zesilovače se používají vzorce:

$$u_1 = u_{diferenční} = u_{inv} - u_{neinv}$$

$$\beta = \frac{u_{diferenční}}{u_{výstupní}}$$



Obr. 5: Obecné schéma operačního zesilovače se zapojenou zpětnou vazbou

Při sestavení operačního zesilovače se zavedenou zpětnou vazbou se výstupní napětí u_2 spočítá podle vztahu:

$$u_2 = \frac{A}{1 - A \cdot \beta} \cdot u_1$$

Přičemž u_1 je vstupní napětí, A je zesílení zesilovače, β je zesílení zpětné vazby.

1.3.1 Dělení zpětných vazeb

Zpětné vazby dělíme podle vlivu na zesílení na:

Kladnou zpětnou vazbu – z výstupu operačního zesilovače se vrací část výstupní úrovně signálu zpět na neinvertující vstup, kde se přičítá k vstupnímu napětí.

Zápornou zpětnou vazbu – z výstupu operačního zesilovače se vrací část výstupní úrovně signálu zpět na invertující vstup, kde se odčítá od vstupního napětí.

Zpětné vazby dělíme podle frekvenční závislosti na:

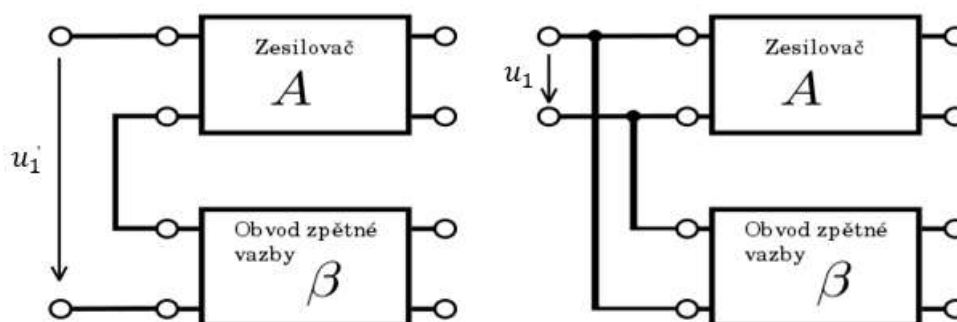
Frekvenčně nezávislé – tuto zpětnou vazbu tvoří frekvenčně nezávislé součástky, jako jsou rezistory, diody a tranzistory

Frekvenčně závislé – tuto vazbu tvoří frekvenčně závislé součástky, nejčastěji kondenzátor a cívka, ale mohou zde být i frekvenčně nezávislé součástky

Zpětné vazby dělíme podle způsobu vedení signálu na vstup na:

Paralelní zpětnou vazbu – je vyznačena paralelním spojením vstupního a zpětnovazebního signálu, vyznačuje se malým vstupním odporem

Sériovou zpětnou vazbu – je vyznačena sériovým spojením vstupního a zpětnovazebního signálu, vyznačuje se velkým vstupním odporem

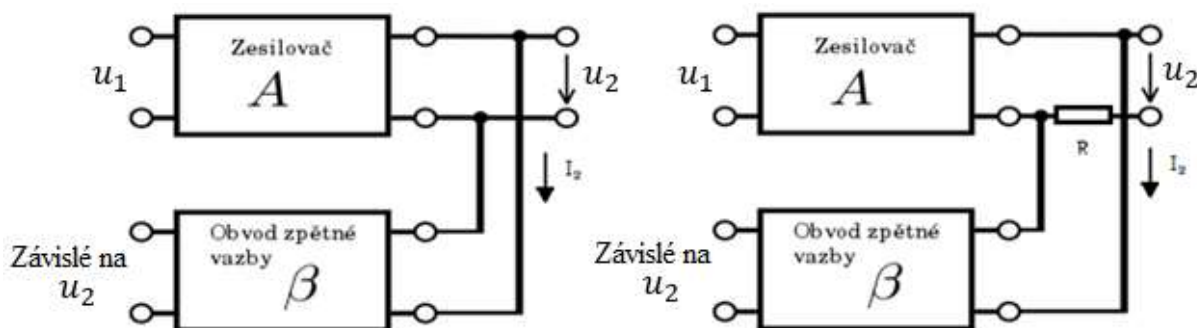


Obr. 6: Obecně zobrazené zapojení sériové (vlevo) a paralelní zpětné vazby (vpravo)

Zpětné vazby dělíme podle typu fyzikální veličiny ve zpětnovazebním signálu na:

Napětovou zpětnou vazbu – přenáší určitou část zpětnovazebního signálu z velikosti výstupního napětí (U_2) operačního zesilovače a vrací jej na vstupní svorky tohoto zesilovače, vyznačuje se malým vstupním odporem

Proudovou zpětnou vazbu – přenáší určitou část zpětnovazebního signálu z velikosti výstupního proudu (I_2) operačního zesilovače a vrací jej na vstupní svorky tohoto zesilovače, vyznačuje se velkým vstupním odporem



Obr. 7: Obecně zobrazené zapojení napětové a proudové zpětné vazby

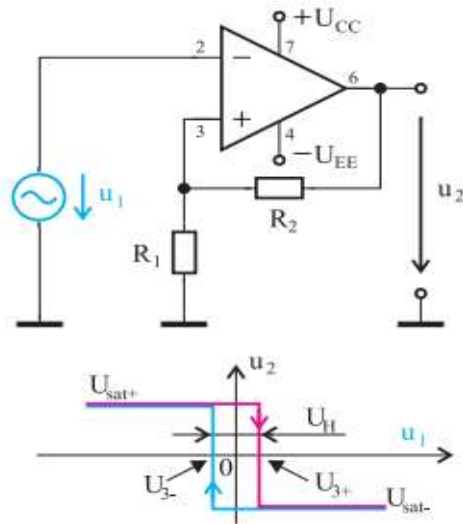
1.3.2 Kladná zpětná vazba

Kladnou zpětnou vazbou označujeme takovou zpětnou vazbu, která po přivedení zpětnovazebního signálu zpět na vstup opět zvýší hodnotu výstupního signálu. Jev se opakuje, dokud se nedosáhne maximálního zesílení. Tato zpětná vazba se u zesilovačů využívá ke vzniku oscilací v oscilátorech.

Podmínka pro rozpoznání kladné vazby je:

$$\beta \cdot A > 0$$

Přičemž β je zesílení zpětné vazby a A je zesílení operačního zesilovače.



Obr. 8: Kladná zpětná vazba použitá v zapojení komparátoru s hysterezí. Převzato z [18]

Zesílení komparátoru se spočítá ze vzorce:

$$A = \frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Přičemž u_1 je vstupní napětí, A je zesílení zesilovače, u_2 je výstupní napětí, R_2 a R_1 jsou odpory ve zpětné vazbě.

Pro výpočet velikosti výstupního napětí platí:

$$u_2 = \frac{u_1 R_2}{R_1} + u_1$$

Přičemž u_1 je vstupní napětí, A je zesílení zesilovače, u_2 je výstupní napětí, R_2 a R_1 jsou odpory ve zpětné vazbě.

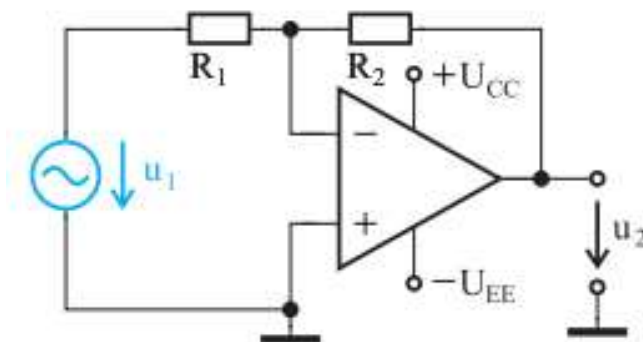
1.3.3 Záporná zpětná vazba

Zápornou zpětnou vazbou označujeme takovou zpětnou vazbu, která po přivedení zpětnovazebního signálu zpět na vstup sníží hodnotu výstupního signálu. Tato zpětná vazba je mnohem používanější než kladná zpětná vazba. Záporná zpětná vazba se u operačních

zesilovačů používá pro teplotní stabilizaci, udržení nastaveného pracovního bodu, snížení zkreslení, nastavení zesílení a pokud je potřeba, tak pro linearizaci obvodu. [2].

Podmínka pro rozpoznání záporné zpětné vazby je:

$$\beta \cdot A < 0$$



Obr. 9: Záporná zpětná vazba použitá v invertujícím zesilovači. Převzato z [18]

Pro výpočet velikosti výstupního napětí platí:

$$u_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot u_1$$

Zesílení zesilovače se spočítá ze vzorce:

$$A = \frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Přičemž u_1 je vstupní napětí, A je zesílení zesilovače, u_2 je výstupní napětí, R_2 a R_1 jsou odpory ve zpětné vazbě.

1.4 Optická zpětná vazba

Optická zpětná vazba se od elektrické zpětné vazby liší tím, že je tvořena optickými a elektrooptickými členy.

- Prvním důležitým členem je elektrooptický převodník a zdroj záření současně. Tento převodník tvoří obvykle LED dioda nebo laserová dioda (LD).
- Druhým členem je optická trasa, kterou v optických vláknových senzorech reprezentuje optické vlákno nebo i vlnovod. Vlákno může být dvojího typu, a to jednovidové nebo mnohovidové. Toto vlákno slouží buďto jako přenosové médium mezi elektrickooptickým převodníkem a samotným senzorem, a poté zase mezi senzorem a optickoelektrickým převodníkem (detektorem). Popřípadě optické vlákno slouží přímo jako senzor pro snímání působení fyzikální veličiny.
- Posledním důležitým optickým členem je optoelektronický převodník. Zde je možné použít fototranzistor, fotoodpor, který je ale teplotně závislý, a proto se běžně nepoužívá. Dále se dá použít lavinová, PIN nebo tunelová dioda.

1.5 LASER

Slovo laser je zkratka z anglického jazyka Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zesilování optického záření pomocí vynucené emise záření.

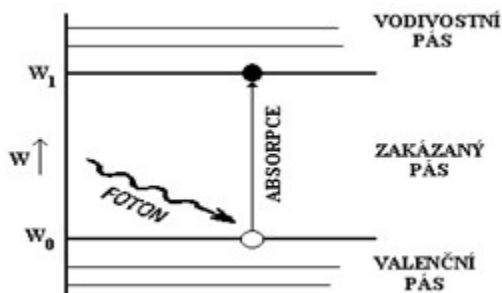
Existuje mnoho typů laserů a jejich dělení. Nejčastější kritérium dělení je podle použitého aktivního prostředí, například polovodičová laserová dioda (nejznámější je GaAs), pevnolátkový laser (nejznámější je rubínový laser nebo Nd-YAG), plynové lasery (nejznámější je He-Ne laser, CO₂), barvivový laser, výhodou je možnost měnit jeho spektrální vyzařování, Polymethinová barviva vyzařují záření v oblasti 700–1500 nm, Xanthenová vyzařují záření na vlnové délce 400–500 nm a Scintilátorová barviva vyzařují na vlnových délkách v ultrafialové oblasti pod 400 nm. [3]

Vznik laserového záření je založen na procesech stimulované absorpce, stimulované emise záření a spontánní emise záření.

1.5.1 Stimulovaná absorpce záření

V principu můžeme jev popsat na modelu dvou energetických hladin. Na nižší energetické hladině se nachází soubor částic, který při dopadu fotonů čerpacího záření přejde na vyšší

energetickou hladinu (například krystal) systému. Čerpací fotony musí být svou frekvencí (vlnovou délkou) v rezonanci rozdílu těchto dvou hladin. Stimulovaná absorpce se využívá pro vytváření stavu takzvané inverzní populace hladin



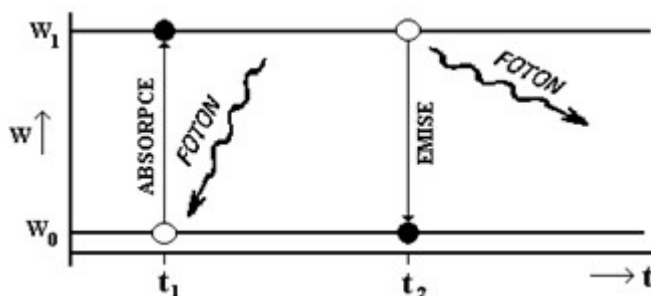
Obr. 10: Model absorpce záření. Převzato z [5]

1.5.2 Inverzní populace hladin

Při stavu inverzní populace na rozdíl od rovnovážného stavu, tedy stavu, kdy se nachází více částic na energeticky nižších hladinách než na energeticky vyšších hladinách. Inverzní populace je tedy jev, kdy se nachází více částic na energeticky vyšší hladině, než je počet částic na energeticky nižší hladině. V látce je nutná k procesu laserového zesílení a laserové generace. Vytvoření inverzní populace se nejčastěji docílí pomocí energetického čerpání.

1.5.3 Spontánní emise záření

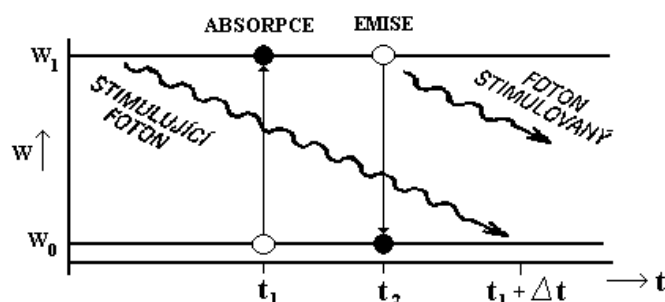
Nejjednodušší vysvětlení spontánní emise je na dvou hladinovém modelu. Mějme částici na hladině s vyšší energií a tato částice samovolně přejde na hladinu s nižší energií. Při tomto procesu vznikne kvantum energie, které se vyzáří jako foton. Vlnová délka tohoto fotonu odpovídá rozdílu energií těchto dvou hladin. Vyzařování fotonů je naprosto nahodilé z hlediska fáze a polarizace.



Obr. 11: Model absorpce a spontánní emise záření. Převzato z [5]

1.5.4 Stimulovaná emise záření

Opět nejjednodušší vysvětlení se nachází na dvou-hladinovém kvantovém systému o energeticky nižší hladině a o energeticky vyšší hladině. Při procesu stimulační emise dochází k rezonančním indukčním přechodům souborů částic z vyšších energetických hladin do nižších a při tom vznikne kvantum koherenčních fotonů. Toto kvantum energie má stejné parametry jako stimulující foton. Vzniklé elektromagnetické záření je koherentní. Koherencí rozumíme spojitost fáze, energie a frekvence dvou nebo více elektromagnetických vln. Samozřejmě při stimulované emisi záření vzniká i spontánní záření, ale tato část záření má charakter šumu. [4]

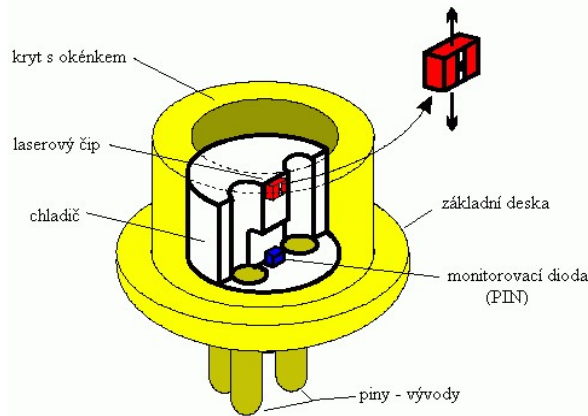


Obr. 12: Model stimulované emise záření. Převzato z [5]

1.6 Polovodičové lasery

Hlavní výhodou polovodičových laserů je čerpání elektrickým proudem, a tudíž současně snadná modulovatelnost čerpacím proudem. Jsou koherentní, mají úzkou oblast spektrálního vyzařování (jednotky až desetiny nm). O zdroji záření říkáme, že je monochromatický. Takový zdroj má malou rozbíhavost výstupního paprsku a vyznačuje se vysokou účinností (až 95%).

První polovodičové lasery byly vytvořeny pomocí homostruktur, ale nebylo možné provozovat tuto laserovou diodu v kontinuálním režimu. Později se přešlo na heterostrukтуры. Tuto metodu použily Žores I. Alfjorov společně s Dmitrijem Z. Garbuzovem. Pro svůj polovodičový laser použili dvojí heterostrukturu, díky velkému poklesu budícího proudu mohla tato dioda začít pracovat v kontinuálním režimu. Za tento objev dostali oba autoři Nobelovu cenu za fyziku, až v roce 2000.



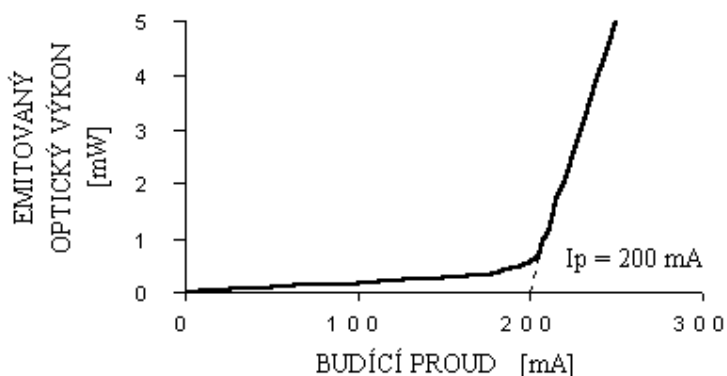
Obr. 13: Pouzdro laserové diody. Převzato z [5]

Laserové diody jsou světlo vyzařující polovodičové součástky. Na rozdíl od světlo emitujících diod (LED), které využívají spontánní emisi záření, laserové diody využívají stimulovanou emisi záření. Díky stimulované emisi záření má emitované světlo lepší parametry, zejména je koherentní a je úzko spektrální. Oproti výše zmiňovanému kvantovému modelu stimulované emise záření je tu rozdíl. Nevyskytuje se zde model s kvantovými hladinami, ale jsou zde přechody mezi energetickými pásy, protože jsou všechny aktivní atomy nahuštěny jeden vedle druhého. Tyto pásy se označují jako valenční a vodivostní pás. Částice přechází při stimulované emisi záření z vodivostního do valenčního pásu. Za předpokladu splnění podmínky pro stimulovanou emisi záření: $E_g < h\nu < E_{fn} - E_{fp}$ kde E_g je šířka zakázaného pásu, jednotkou je [eV] h je Planckova konstanta ($h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J·s), ν je frekvence záření, E_{fn} je Fermiho kvazihladina pro elektrony a E_{fp} je Fermiho kvazihladina pro díry. Použité aktivní prostředí je buďto okolí heteropřechodu nebo PN přechodu. Zde dochází k injekci děr a elektronů. Použití optického rezonátoru získáme vznik stojatého vlnění čili koherenci. V rezonátoru dochází k zavedení kladné zpětné vazby. Nejčastěji využívaným rezonátorem je Fabry - Perotův rezonátor. Není zde potřeba kvalitních polopropustných zrcadel, protože je zde použit rezonátor s rozhraním polovodič – vzduch. Jako u většiny rezonátorů je zde potřeba mít vzájemnou rovnoběžnost obou protilehlých stěn z polovodičového materiálu. Tento rezonátor musí být kolmý k rovině PN přechodu. Kvalita rezonátoru je přímo úměrná výstupnímu stupni koherence.

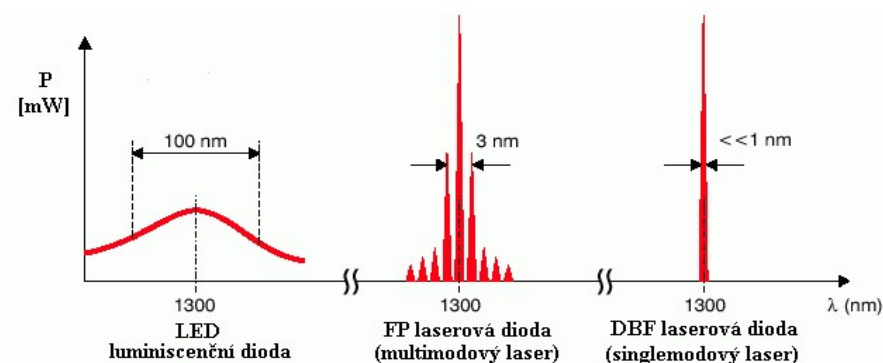
Použití této polovodičové laserové diody je velice časté v průmyslových odvětvích a hlavně v telekomunikačních odvětvích. A to především díky možnosti dobré modulovatelnosti do řádů

jednotek GHz, nízké setrvačnosti a nízkému napájecímu napětí, příznivé ceně a velké škále parametrů diod. Nejsou příliš používané pro měření kvůli nízké koherenci a špatné teplotní stabilitě.

Je zde potřeba příslušný kvalitní napájecí zdroj, protože pokud nedosáhneme proudu vyššího nebo alespoň stejného jako je prahový proud laserové diody, dochází tak pouze k emitování slabšího spontánně stimulovaného záření. Tím je toto záření náhodné neboli nekoherentní. Prahový proud laserové diody je takový proud, kdy laser náhle přejde z režimu vyzařování spontánní emise do režimu vyzařování stimulované emise. Při překročení prahového proudu strmě narůstá výkon výstupního záření, snižuje se spektrální šířka záření, zlepšuje se koherence a úhel vyzařování. Hodnota prahového proudu se obvykle pohybuje v desítkách až stovkách miliampér, ale je závislá na teplotě. Při ohřátí o 1 °C se hodnota prahového proudu změní přibližně o 15 %. [5].



Obr. 14: VACH laserové diody. Převzato z [5]



Obr. 15: Srovnání spektra polovodičových zdrojů záření. Převzato z [7]

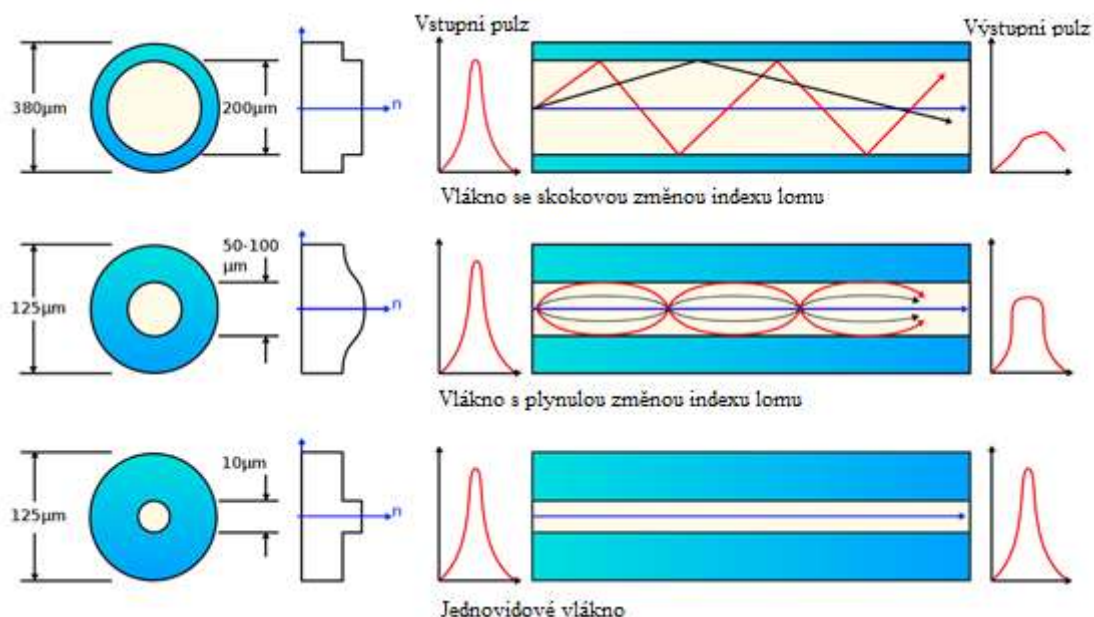
1.7 Optické vlákno

Optické vlákno je přenosové prostředí, které se nejčastěji používá pro datový přenos, ale dá se také využít jako pasivní snímací prvek. Optické vlákno je vlnovod, respektive světlovod, kde se světlo šíří z jednoho zakončení na druhé zakončení s využitím zákona o totálním odrazu, ke kterému dochází na rozhraní jádra a pláště. Vid nebo také "mód" je veden v jádře vlákna. Podle vybrané aplikace senzoru lze zvolit vhodný typ vlákna.

Skladba optického kabelu:

1. Jádro
2. Plášť
3. Primární ochrana
4. Sekundární ochrana

Jsou dva základní typy optického vlákna. První typ je jednovidový, častěji je označováno jako single mode, druhý typ je mnohovidový, častěji je označováno jako multi mode.



Obr. 16: Typy optických vláken. Převzato z [8], upraveno

1.7.1 Jednovidové optické vlákno

Jak už název napovídá, pro přenos informace slouží pouze jeden vid (mód) záření, který se šíří jádrem z jednoho konce k druhému. Toto vlákno nemá vidovou disperzi. Na obr. 16 je

jednovidové vlákno třetí od vrchu. Velikost jádra jednovidového vlákna musí být menší než 3,6 krát navázaná vlnová délka světla. Nejčastěji se v telekomunikacích používá optické vlákno s průměrem jádra 9 μ m.

Vzorec určující mezní vlnovou délku pro vlákno:

$$\lambda > \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405}$$

Přičemž λ je mezní vlnová délka, a je průměr jádra vlákna, n_1 je index lomu jádra vlákna, n_2 je index lomu pláště vlákna a konstanta **2,405** je první kořen beselovi funkce.

1.7.2 Mnohovidové optické vlákno

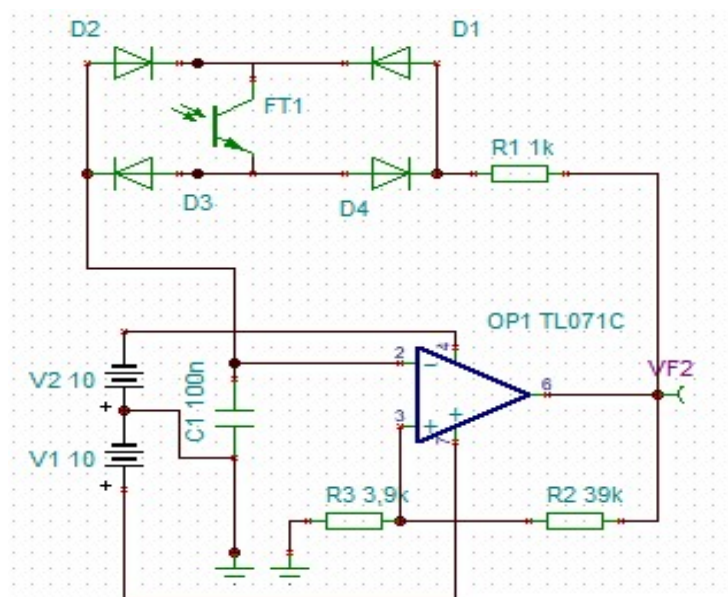
Na obr. 16 jsou první dva typy vláken mnohovidová. Pro přenos informace slouží větší počet vidů, který se společně šíří vláknem. Používají se dva typy vláken, a to “step index“ (skoková změna indexu lomu) a “graded index“ (plynulá změna indexu lomu).

2 Druhá kapitola – Experimentální část

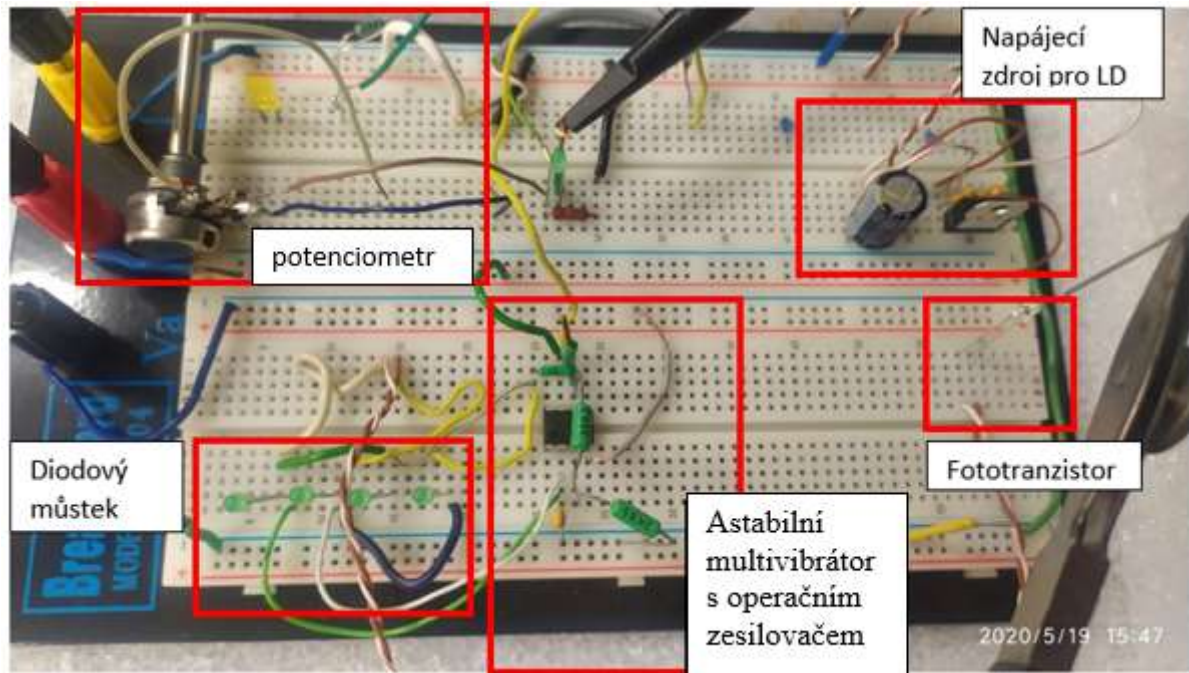
2.1 Senzor s optoelektronickou zpětnou vazbou

Celý obvod oscilačního senzoru s optoelektronickou zpětnou vazbou a jeho přibližný pracovní režim byl simulováno v programu Tina-Ti od firmy Texas Instruments.

Pozornost byla zaměřena na problematiku chování oscilačního obvodu s kladnou a zápornou optoelektronickou zpětnou vazbou. Základem optoelektronického oscilačního senzoru, který byl vybrán jako experimentální model této bakalářské práce, je rozšířené zapojení astabilního multivibrátoru (obr. č. 17), který je složený jak z kladné, tak ze záporné optické zpětné vazby a optické zpětné vazby vedené z výstupu skrze optické vlákno, které přivádí záření na fototranzistor. V obvodu se tedy nachází jak elektrická, tak optická zpětná vazba, kdy část signálu a informace je vedena optickým vláknem. Fototranzistor je součástí záporné zpětné vazby. Kladná zpětná vazba je tvořena odporovým děličem (R_2 , R_3). Tato zpětná vazba zajišťuje rozkmitání celého obvodu z kladného saturačního napětí do záporného saturačního napětí a zpět. Záporná zpětná vazba je tvořena sériovým spojením odporu (R_1) a fototranzistoru (FT_1), který je doplněn o usměrňovací diodový můstek (D_1 , D_2 , D_3 , D_4) a kondenzátoru (C_1). O záporné zpětné vazbě se dá říci, že jde o frekvenčně závislou (RC článek) adaptivní zpětnou vazbu. V literatuře se toto zapojení dá dohledat jako převodník intenzity osvětlení na kmitočet. [2]

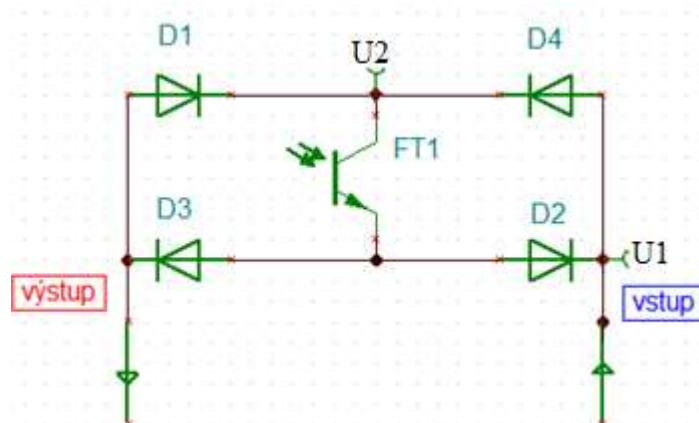


Obr. 17: Astabilní multivibrátor s operačním zesilovačem

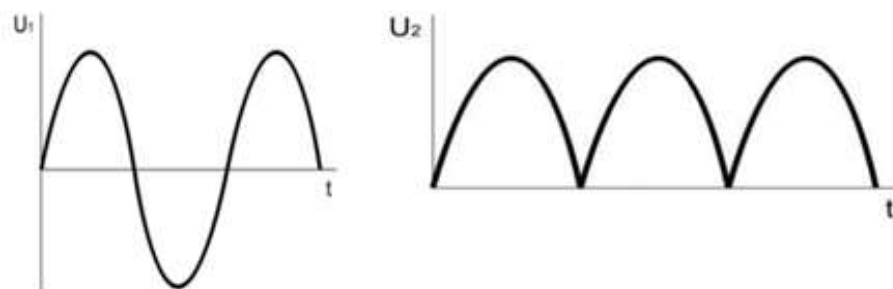


Obr. 18: Fotografie experimentální realizace oscilačního optoelektronického senzoru

Fototranzistor je typu NPN od výrobce OSRAM model SFH 309-3/4, a proto je schopen zpracovat jen kladnou úroveň procházejícího signálu. Z tohoto důvodu byl do obvodu zapojen diodový můstek, jehož funkce spočívá v obrácení záporné půlperiody do kladných hodnot. Zapojení tohoto diodového můstku je stejné jako v principu Graetzova usměrňovacího můstku. V zapojení je můstek složen z LED diod, protože při nízkých frekvencích bylo možné vidět, jak jednotlivé diody světelně pulzují a tím bylo možné obvod snadněji naladit k oscilacím.



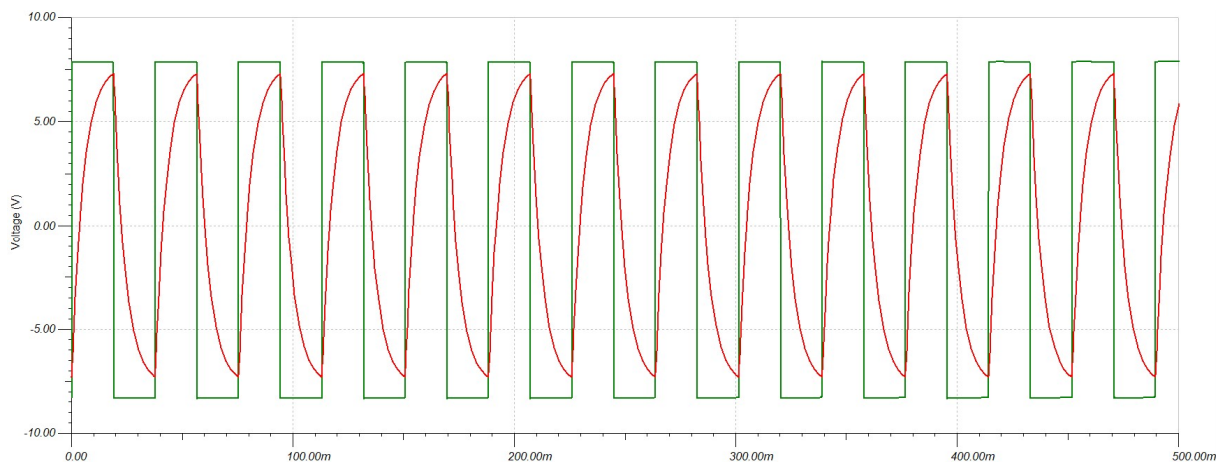
Obr. 19: Zpětnovazební můstek s fototranzistorem



Obr. 20: Graf vstupního napětí (vlevo) a výstupního napětí (vpravo), ($U_2 < U_1$)

Výstupní signál tohoto obvodu je skoro obdélníkového průběhu, a to v mezích od kladného saturačního napětí do záporného saturačního napětí. Saturační napětí má téměř hodnotu napájecího napětí, výstupní napětí nedosahuje napájecího napětí, protože na všech součástkách vzniká úbytek napětí. Součet všech úbytků napětí je roven rozdílu mezi napájecím a saturačním napětím. V simulačním programu se při napájecím napětí s hodnotou $\pm 10\text{V}$ na výstupu operačního zesilovače (zelený průběh) ukázalo saturační napětí $\pm 8,08\text{V}$. Střída (poměr trvání kladného a záporného pulzu) výstupního průběhu je 1:1. Červeně zobrazený průběh je napětí, které se akumuluje v kondenzátoru (C_1), dokud nedosáhne napětí potřebného k překlopení vnitřního komparátoru OZ, a tudíž se překlopí i výstupní napětí. V zapojení je na výstupu potenciometr. Pomocí polohy jezdce se dá měnit velikost výstupní amplitudy.

Po zapnutí takového zařízení za předpokladu, že kondenzátor (C_1) má nulové napětí při předpokladu, že je na výstupu kladné napětí a tím i na neinvertujícím vstupu se vnitřní komparátor OZ a zároveň výstup překlopí do kladné saturace. Záporná zpětná vazba přivádí přes R_3 a diodový můstek s fototranzistorem napětí na kondenzátor (C_1), ten se začne nabíjet a exponenciálně na něm roste napětí, dokud není úroveň napětí větší než na neinvertujícím vstupu. Vnitřní komparátor OZ se překlopí do opačné (záporné) saturace. Na neinvertujícím vstupu je napětí vedené přes dělič (R_2 a R_3) zápornější než na invertujícím vstupu. Kondenzátor (C_1) se začne vybíjet, dokud se nenabije na záporné napětí větší, než je na neinvertujícím vstupu a tím se komparátor OZ a výstupní napětí opět překlopí do opačné (kladné) saturace. Takto se celý děj opakuje, dokud neodpojíme napájení.



Obr. 21: Výstupní průběh napětí operačního zesilovače (zeleně)
a průběh napětí na kondenzátoru (červeně)

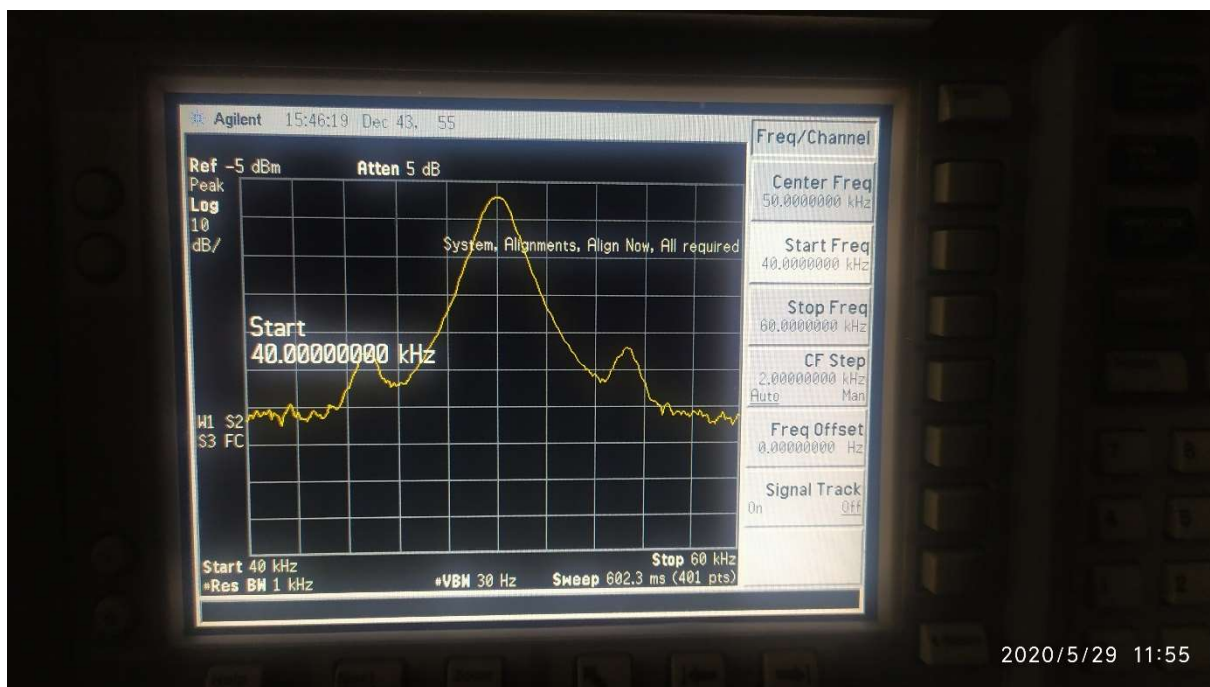
Výstupní frekvence (**f**) tohoto oscilátoru se dá spočítat podle vzorce. Převzato z [11]:

$$f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C_1 \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot R_3}{R_2}\right)}$$

Přičemž odpory R_1 a R_2 jsou odpory v kladné zpětné vazbě, C_1 je kondenzátor v záporné zpětné vazbě a odpor R je definovaný jako sériové spojení odporu R_3 a odporu diodového můstku se zapojeným fototranzistorem. Tento odpor je velice těžké určit výpočtem, protože všechny součástky mají rozdílný dynamický odpor. Pro výpočet je potřeba změřit dynamický rozsah součástek. Tato metoda je velice složitá a nedosahuje se dostatečné přesnosti. Proto byla zvolena metoda měření dynamického odporu v záporné zpětné vazbě pomocí měřicího přístroje „RLC multimetru“. Celá záporná zpětná vazba funguje na principu změny rychlosti nabíjení kondenzátoru (C_1) prostřednictvím změny hodnoty odporu fototranzistoru.

2.1.1 Spektrální analýza

Spektrální analýza výstupního signálu ze senzoru byla provedena na přístroji Agilent E4411B. Tímto měřením je možné sledovat posun spektrální křivky na monitoru vlevo nebo vpravo při kolísání frekvence ve zpětné vazbě a tím vizuálně vyhodnotit přesnou změnu frekvence výstupního signálu a jeho stabilitu.



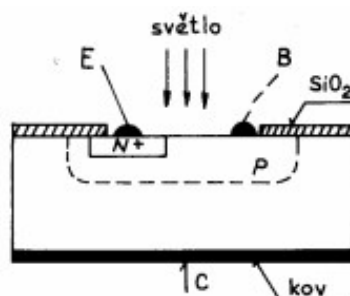
Obr. 22: Fotografie spektra výstupního signálu oscilačního optoelektronického senzoru

2.1.2 Fototranzistor

V záporné zpětné vazbě byl zvolen jako fotodetekční prvek fototranzistor.

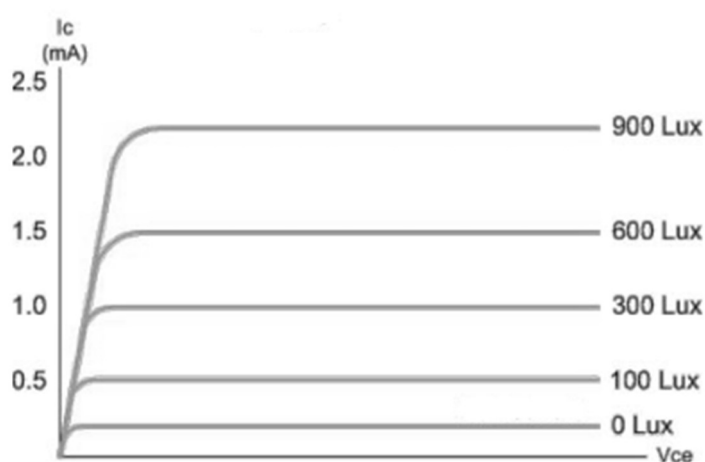


Obr. 23: Schématická značka fototranzistoru

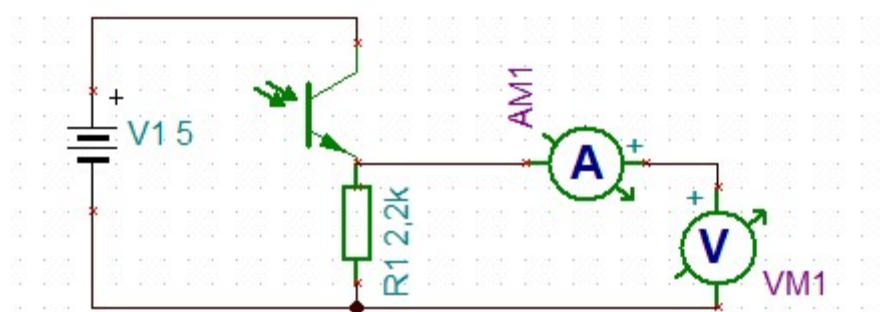


Obr. 24: Zjednodušený průřez planárně vyrobeným fototranzistorem. Převzato z [13]

Fototranzistor je podobný bipolárnímu tranzistoru, ale nemá vyvedený bázevý vstup. To znamená, že ovládání otevření přechodu PN není pomocí elektrického signálu, ale otevření přechodu se ovládá vstupní intenzitou záření přivedeného do oblasti báze. Při dopadu světla na bázi se vytváří páry elektron – díra. Elektrony směřují směrem k emitoru a díry směřují ke kolektoru. Počet nosičů náboje se úměrně zvětšuje s přibývajícím intenzitou světla. A dochází zde k zesílení proudu procházející bázi, stejně tak jako tomu je u bipolárního tranzistoru. Díky tomuto je citlivost až o dva řády větší, než jak je tomu u fotodiody. Fototranzistor není vhodný pro rychlé přechody, protože nemá tak krátkou dobu odezvy jako fotodiody. Při výrobě se používá planárně epitaxní technologie stejně jako u bipolárních tranzistorů.



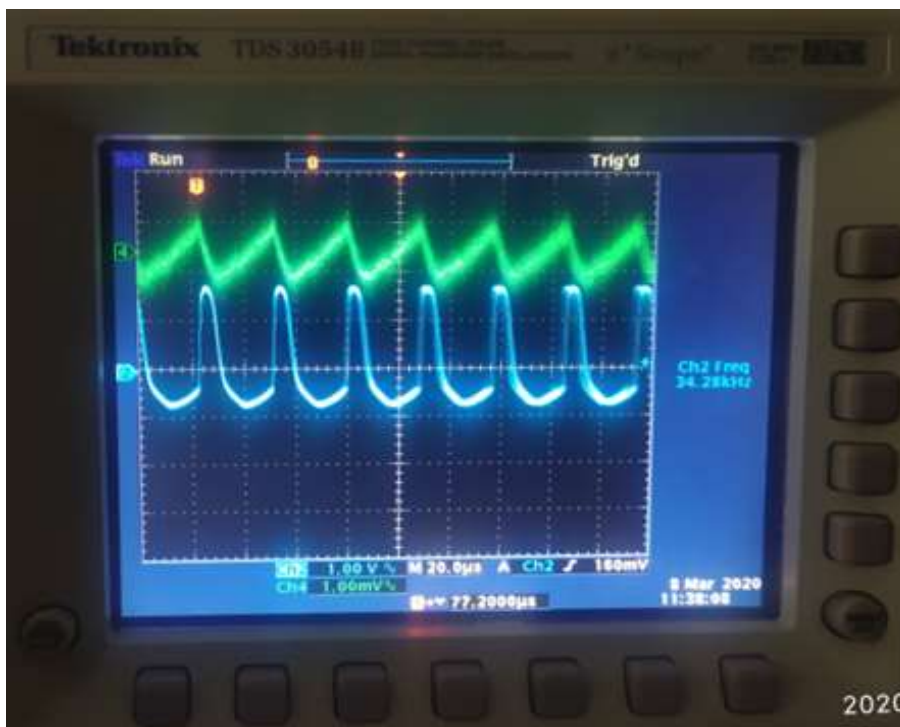
Obr. 25: VACH fototranzistoru. Převzato z [3], upraveno



Obr. 26: Schéma pro měření VACH

K realizaci zdroje záření (vysílače) pro optoelektronickou zpětnou vazbu a vytvoření komplexní zpětné vazby byla vybrána polovodičová laserová dioda FP-SMA-650-30M-1MHz. Záření z laserové diody je dále navázáno pomocí fokusačního mikroskopového objektivu se

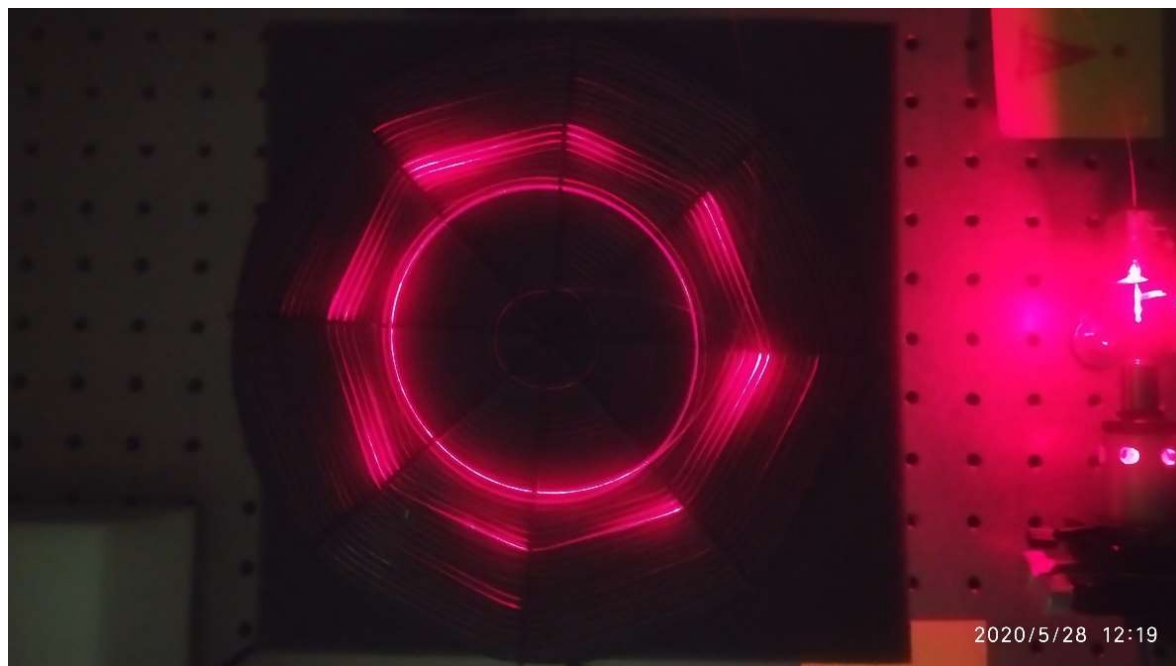
zvětšením 10x a numerickou aperturou 0,30 do optického vlákna SMF 28. Tímto byla uzavřena optická zpětná vazba.



Obr. 27: Výstupní průběh oscilačního obvodu optoelektronického senzoru (modrý) a průběh signálu laserového svazku dopadajícího na fototranzistor z optického vlákna, nasnímaný sondou s PIN diodou (zelený)

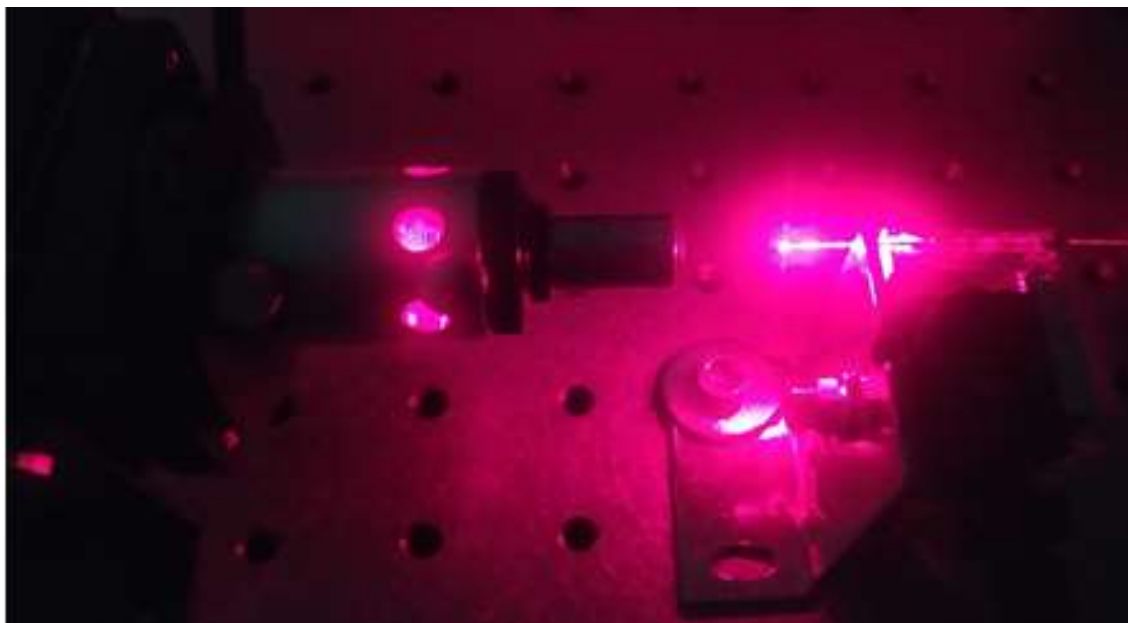
2.2 Optoelektronická zpětná vazba

Jako snímač fyzikální veličiny je použito jednovidové optické vlákno SMF 28, které je navinuto jako cívka na plastovém podkladu. Laser je navázán na čelo optického vlákna pomocí držáků s mikroposuvy. Samotnou délkou optického vlákna a typem optického vlákna se dá ovlivnit citlivost celého senzoru. Dále je nutné kvalitní navázání laserového svazku do optického vlákna a vyvázání optického svazku do místa báze fototranzistoru.



Obr. 28: Zpětnovazební senzorická cívka s optickým vláknem

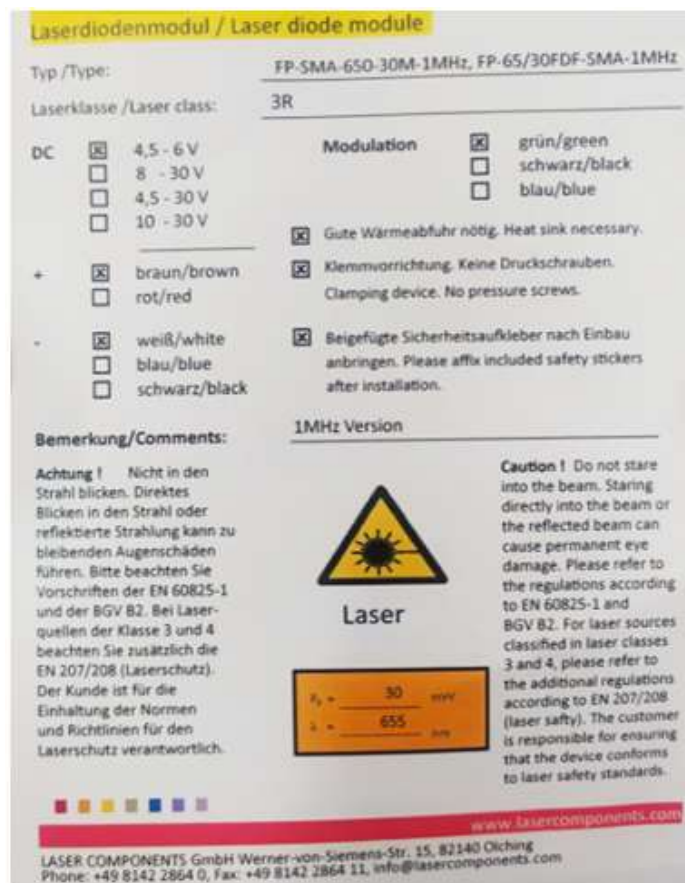
Na této cívce vlákna bez sekundární ochrany je vidět takzvané „vytékání“ části záření z jádra skrze obal a primární polymerovou ochranu. Již pouhým vizuálním pozorováním je vidět, jak snadno pouhým ohybem je možno ovlivnit přenosové vlastnosti optického vlákna.



Obr. 29: Fotografie navázání optického svazku do optického vlákna

Na Obr. 29 je vidět, jak je laserová dioda FP-SMA-650-30M-1MHz opatřena mikroskopovým objektivem, který fokusuje laserový svazek na čelo optického vlákna. Optické vlákno je připojeno k dvouosému (xy) mikroposuvu a tento posuv funguje v horizontální a vertikální ose. Pro snadnější navázání by bylo vhodné použití posuv ve směru šíření (z). Tím by bylo jednodušší nalézt přesné místo pasu svazku, kde je nutné umístit čelo optického vlákna pro kvalitní navázání. V tomto případě bylo navázání realizováno postupným posouváním čela vlákna do místa pasu svazku laserového záření. Vlákno je v trubičce, která slouží jako optimální držák.

Spínání laserové diody není přímé, ale použitá laserová dioda má modulovací vstup a je modulovatelná do frekvence 1MHz, to znamená, že nepotřebuje výkonový stupeň. Tento laser má tři vývody. Dva slouží pro připojení trvalého napájecího napětí (4,5V až 6V, je použito 5V) (barva těchto vývodů je bílá a hnědá) a třetí vývod je pro připojení modulačního TTL signálu (barva tohoto vývodů je zelená), v mém případě připojen k výstupu astabilního multivibrátoru.



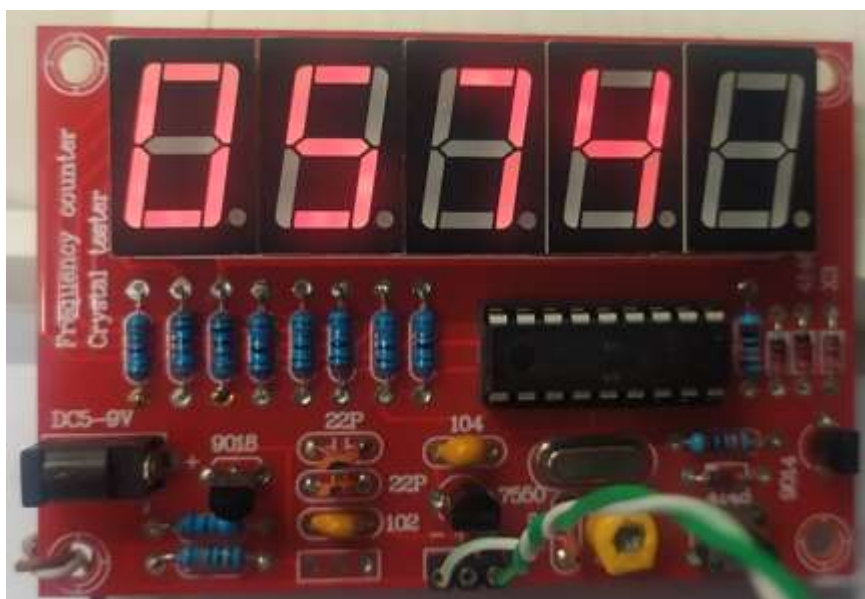
Obr. 30: Katalogový list laserové diody FP-SMA-650-30M-1MHz

Záření je vyvázáno z optického vlákna, respektive z optického konektoru, přímo na bázi fototranzistoru. Pomocí držáku optického konektoru lze nastavit navázání optického výkonu na fototranzistor. Zde není až tak důležité mít mikroposuv, protože vstupní úhel fototranzistoru by měl být okolo 12°.

2.3 Monitorování výstupní frekvence

Pro odladění obvodu a monitorování výstupní frekvence je v nejjednodušším případě pro kmitočty do 18kHz (rozsah lidského sluchu) možné použít malý reproduktor.

Současně je možné připojení osciloskopu, kde je dostupná funkce měření frekvence. Avšak toto měření není přesné, a ne vždy osciloskop měří námi požadovanou frekvenci (zobrazuje frekvenci vyšší harmonické). Takže pro vyhodnocení výstupní frekvence byl zvolen frekvenční čítač. Jelikož návrh čítače není cílem mé práce a konstrukce čítače je složitá, protože vyžaduje použití speciálních obvodů nebo použití mikroprocesoru. Následně byla využita zakoupená stavebnice frekvenčního čítače.



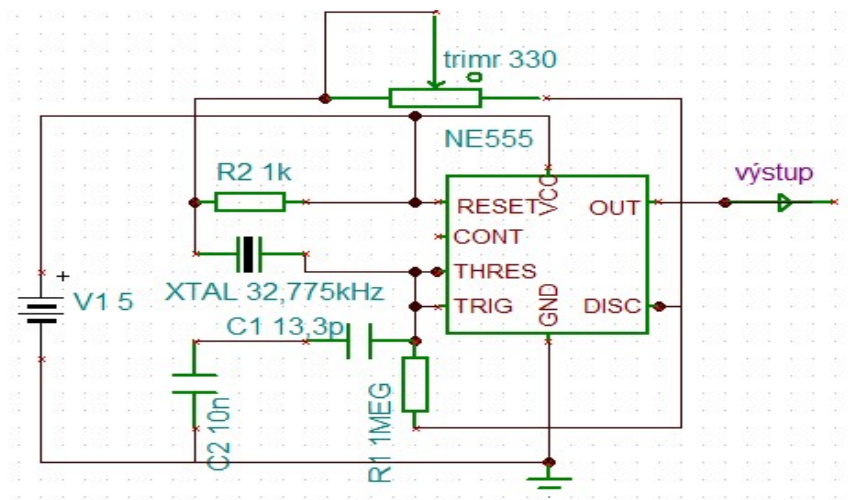
Obr. 31: Fotografie sestaveného frekvenčního čítače

Tento frekvenční čítač stál necelých 100 Kč, takže je velmi dostupný a pro danou aplikaci dostačující. Napájecí napětí je v rozsahu 5 V až 9 V a frekvenční rozsah je od 1 Hz až do 50 MHz. Mimo jiné se toto zařízení dá použít i pro testování rezonanční frekvence krystalů. Zobrazení probíhá na pěti sedmissegmentových zobrazovacích jednotkách. Rozsah se přepíná automaticky a k rozlišení zobrazování mezi kHz a MHz slouží desetinná tečka. Když desetinná tečka bliká, tak je údaj v kHz, a když desetinná tečka svítí, tak je údaj zobrazený v MHz. Zobrazení frekvencí nižších než 1 kHz probíhá jako zobrazení desetinného čísla. Při měření přesnosti tohoto přístroje byl použit kalibrovaný frekvenční generátor a laboratorní frekvenční čítač. Odchyłka obou zobrazených frekvencí se pohybovala v rozmezí 2 Hz, což je dobrý výsledek.

Nyní bylo nutné neustále přepočítávat změnu frekvence od nominální hodnoty. Takový postup není vůbec komfortní ani praktický, neboť může lehce dojít k přepočtu a chybnému výsledku. Proto byly přidány dva obvody, a to etalon, jako zdroj nominální hodnoty frekvence a diferenční člen, který by vyhodnotil rozdíl hodnot frekvencí z etalonu a samotného oscilačního optovláknového senzoru.

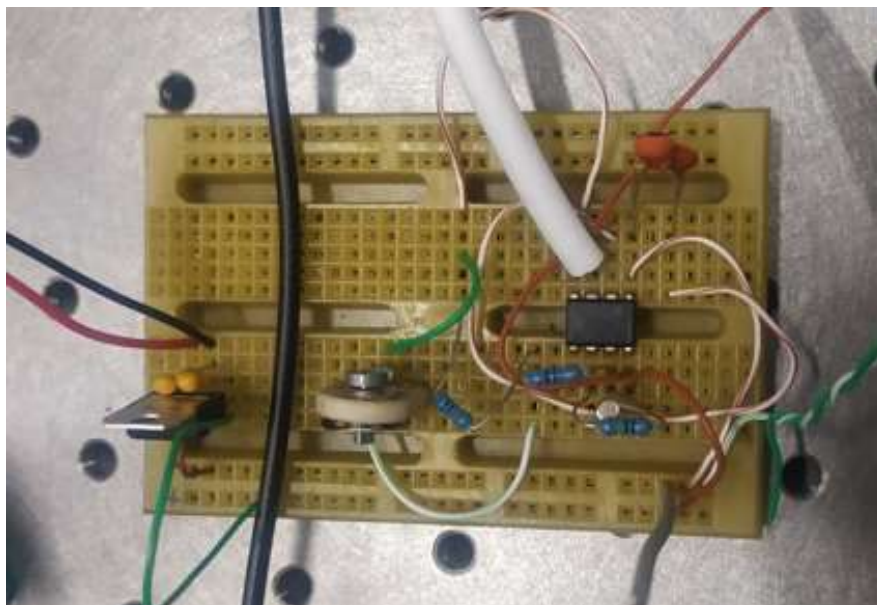
2.4 Frekvenční etalon s NE555 a s krystalem

Oscilátorů je nepřeberné množství. Každý z nich má své výhody i nevýhody. Některé jsou jednodušší, některé složitější. Nejznámější oscilátory jsou oscilátor s Wienovým článkem, s přemostěným T-článkem, Hartleyův oscilátor, Colpittsův oscilátor, Clappův oscilátor, krystalové oscilátory s tranzistory nebo krystalové oscilátory s invertory. Pro svou jednoduchost, a pro mé použití, byl dostatečným oscilátorem zvolen krystalový oscilátor s obvodem NE555.

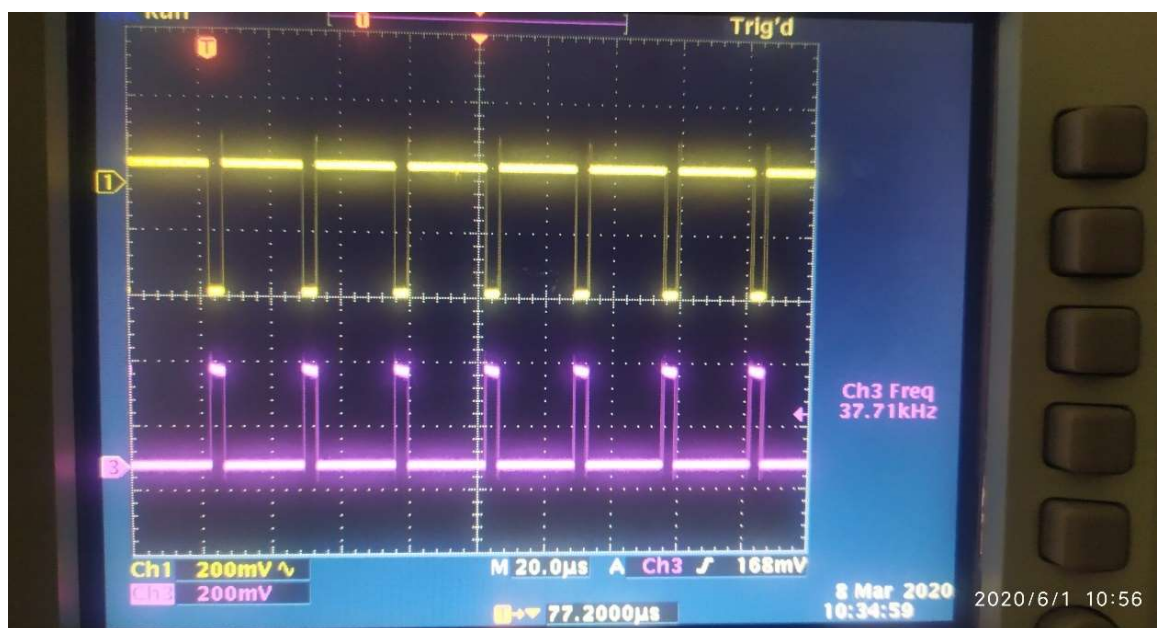


Obr. 32: Schéma zapojení krystalového oscilátoru s NE555

Toto zapojení je schopné pracovat podle použitého krystalu na maximální frekvenci cca 250kHz. Po překročení této frekvence přestane obvod NE555 překlápat, protože jeho vnitřní konstrukce není na větší frekvence určena. Proto je použit krystal o frekvenci 32,775kHz. Ale pro přesnou funkci je potřeba podle prostředí doladit hodnotu odporu R2. V tomto zapojení je k rezistoru R2 připojen sériově trimr o hodnotě 330Ω a pomocí tohoto trimru lze obvod v případě potřeby doladit na rezonanční frekvenci.



Obr. 33: Fotografie fyzické realizace krystalového oscilátoru s NE555

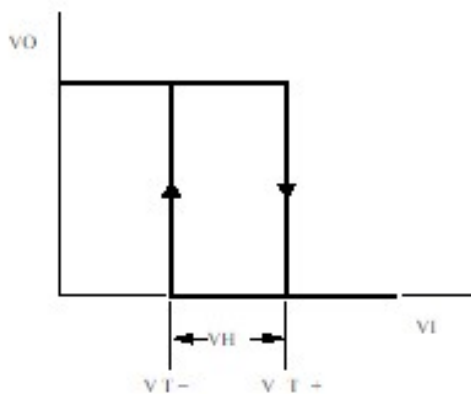


Obr. 34: Výstupní průběh krystalového oscilátoru NE555 (žlutý průběh)

Invertovaný průběh krystalového oscilátoru NE555 (fialový průběh)

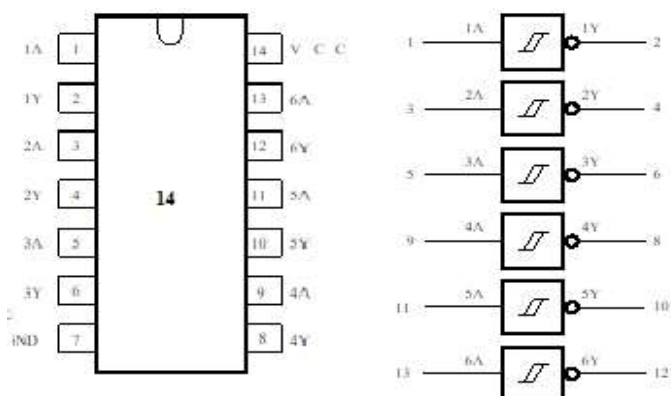
2.5 Obvod frekvenčního rozdílu

Pro odečítání rozdílů frekvencí z mého optovláknového amplitudového snímače a krystalového oscilátoru s obvodem NE555 byla navržena možnost použití D-klopného obvodu. Přesněji se jedná o CMOS obvod 74HC74. Po nastudování problematiky bylo zjištěno, že je tento obvod poměrně citlivý na tvar vstupního průběhu a na jeho amplitudu, protože z optovláknového ani z krystalového oscilátoru nevychází přesně obdélníkový průběh s amplitudou pohybující se v rozsahu 2,5V až napájecí napětí tohoto D-klopného obvodu. V tomto experimentu je použito 5V. Je použit na vstupu tohoto obvodu CMOS obvod 74HC14. Obvod 74HC14 je integrovaný obvod, ve kterém se nachází šest jednovstupých invertorů na jejichž vstupech se nachází schmittův klopný obvod (SKO), který vykazuje hysterezi. Tento invertor vytváří na výstupu opačný potenciál, než je na jeho vstupu. To znamená, že pokud je přivedena logická úroveň H na vstup, tak na výstupu bude logická úroveň L. A pokud je přivedena logická úroveň L na vstup, tak na výstupu bude logická úroveň H. Když je na vstupu logická úroveň H a pokud vstupní úroveň napětí na vstupu překoná hodnotu V_{T+} , obvod se překlopí do logické úrovně L. Po snížení vstupní úrovně napětí a překonání hodnoty V_{T-} se výstup invertoru překlopí do logické úrovně H. Rozsah napájecího napětí je 2V až 6V. Je použito napájecí napětí 5V.

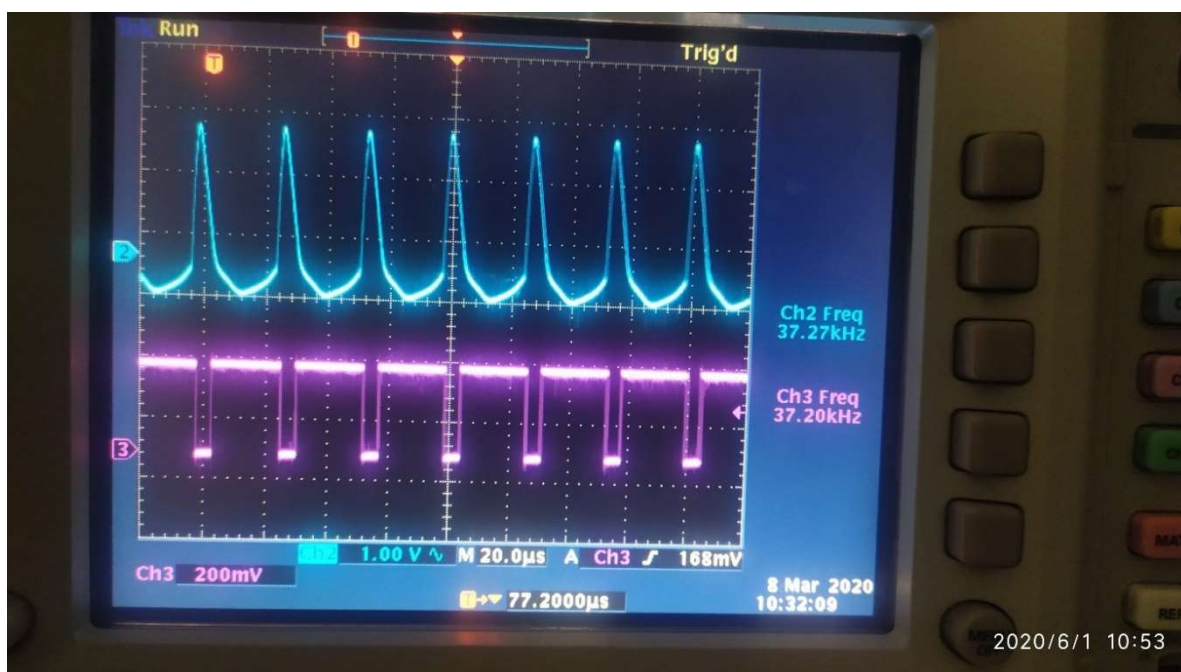


Obr. 35: Hysterezní charakteristika obvodu 74HC14. Převzato z [14]

Hlavní požadavek, v případě využití daného obvodu, byl kladen na obdélníkový výstupní průběh, a na úpravu výstupní amplitudy napětí. Diagram úpravy průběhu na obdélníkový je vidět na obr. 37.



Obr. 36: Schématická značka a rozložení vývodů pouzdra DIP14. Převzato z [14]

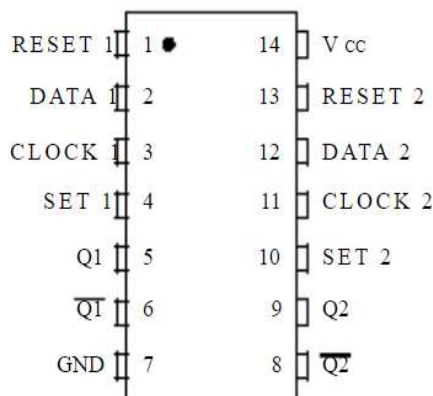


Obr. 37: Fotografie invertovaného pulzu (fialový průběh) ze snímače (modrý průběh)

Protože experiment má jen dva generátory (krystalový oscilátor NE555 a oscilační optovláknový senzor), tak jsou využity pouze dvě z celkových šesti hradel, a to 1A a 1Y, a 3A a 3Y.

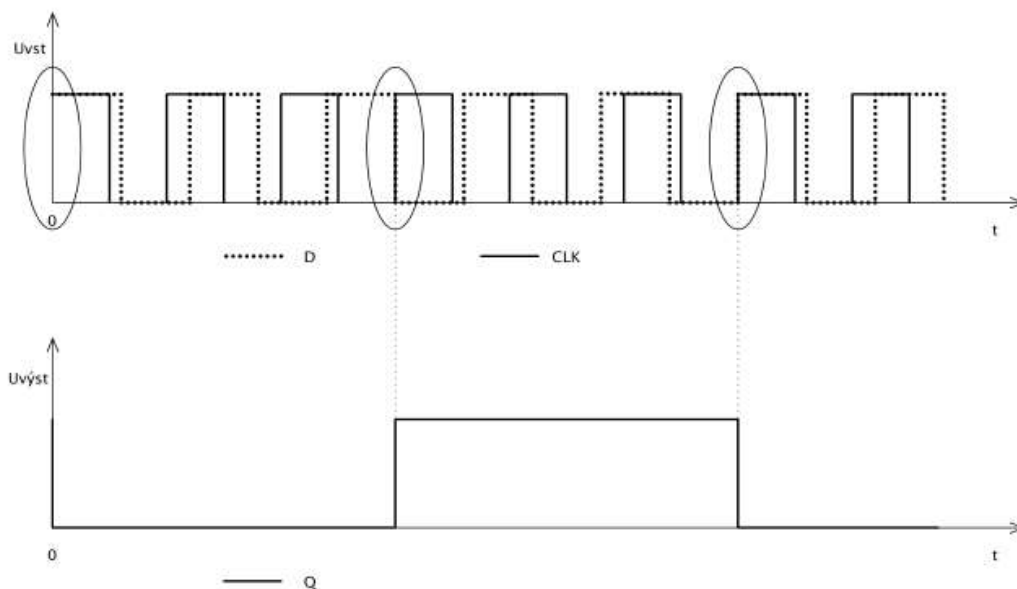
Obvod 74HC74 je klopný obvod typu D s možností přednastavení sepnutí a resetu. Je aktivován náběžnou hranou vstupního signálu. V pouzdře DIP14 se nachází dva oddělené D-

klopné obvody. Tento obvod je typu CMOS a má napájení je v rozsahu 2V až 6V. V tomto případě, pro možnost propojení s dalšími obvody bylo opět zvoleno napětí 5V.






Obr. 38: Rozložení vývodů pouzdra DIP14 obvodu 74HC74. Převzato z [15]

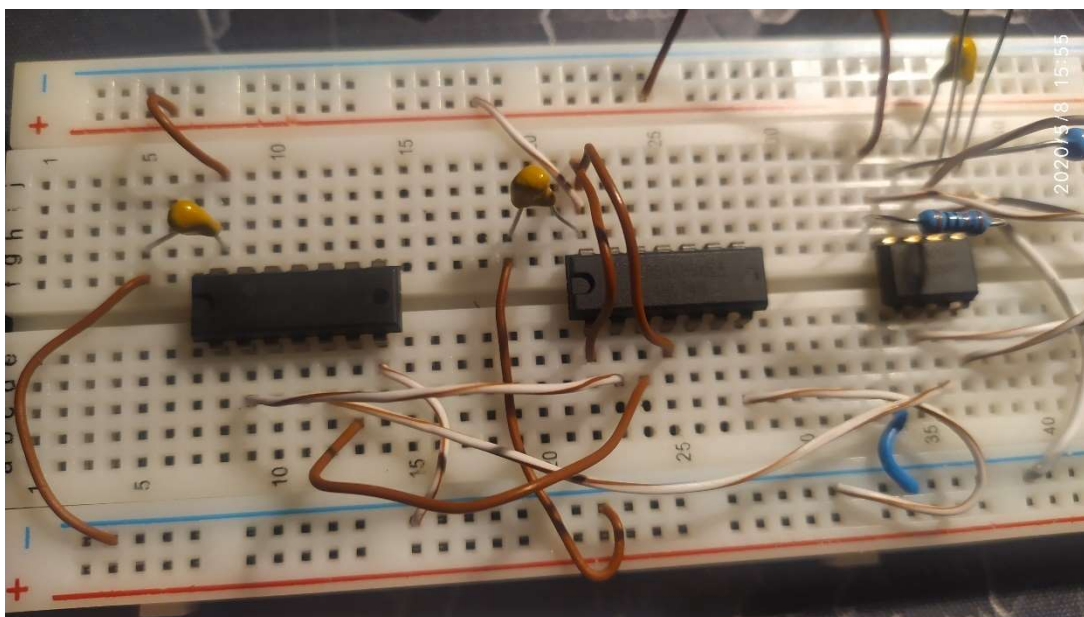
Využití pro vstupy přednastavení sepnutí a resetu nebylo nalezeno, takže podle doporučení výrobce byly připojeny k napájecímu napětí. Na vstup CLK jde invertovaný průběh napětí z obvodu 74HC14, a to z obvodu krystalového oscilátoru s NE555). Na vstup D jde invertovaný průběh napětí z obvodu 74HC14, a to z obvodu oscilačního optovláknového senzoru. Dále má obvod dva výstupy, kde výstup \bar{Q} je invertovaný oproti výstupu Q, pro výstup do čítače je použit Q výstup.



Obr. 39: Obecný průběh závislosti výstupního průběhu (Q) na vstupních průbězích (D a CLK). Převzato z [19]

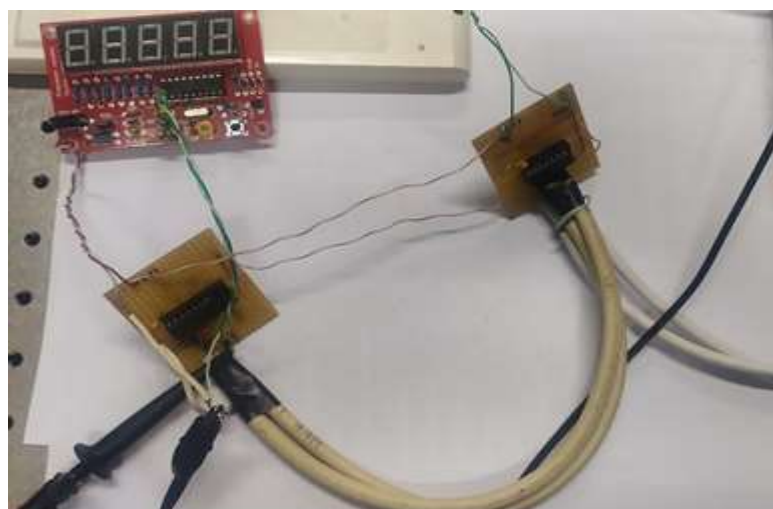
Inputs				Outputs	
Set	Reset	Clock	Data	Q	\bar{Q}
LH		X	X	HL	
HL		X	X	L	H
L	L	X	X	H*	H*
HH			H	H	L
HH			L	L	H
H	H	L	X	No Change	
H	H	H	X	No Change	
H	H		X	No Change	

Obr. 40: Pravdivostní tabulka 74HC74. Převzato z [15]



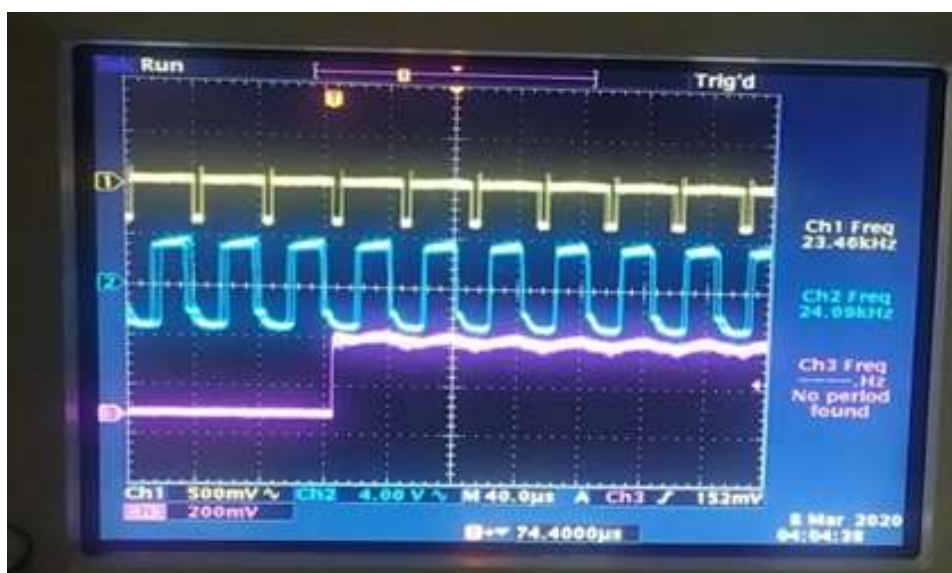
Obr. 41: Realizace frekvenčního rozdílu na nepájivém poli

Realizace na nepájivém poli, zleva invertor 74HC14, uprostřed D-klopný obvod 74HC74 a vpravo krystalový oscilátor s NE555. Realizace těchto obvodů na jednom nepájivém poli nebyla vyhovující, protože se zde vyskytla nějaká frekvenční vazba a rozdíl frekvencí nebyl korektní. Toto zapojení muselo být přestavěno tak, aby byl každý obvod zvlášť, a musel se propojit stíněnými kabely.



Obr. 42: Realizace diferenčního obvodu na pájivém poli s připojeným čítačem frekvencí

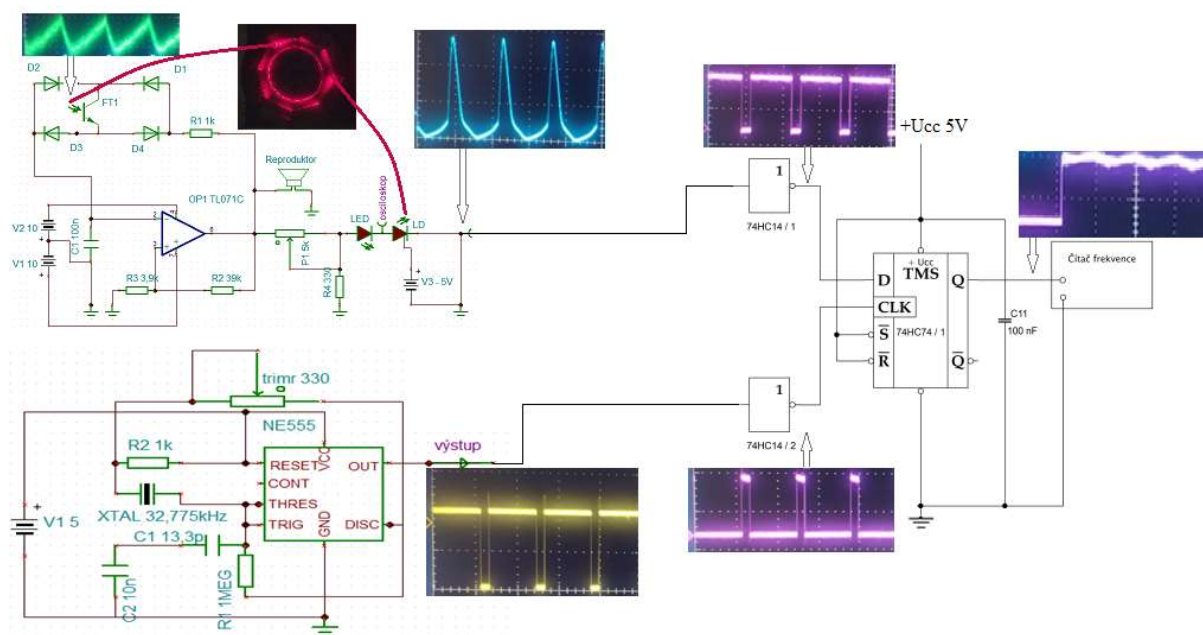
Po přestavění obvodu frekvenčního rozdílu, zejména po oddělení krystalového oscilátoru a připojení stíněnými koaxiálními kabely, se výsledky frekvenčního rozdílu podstatně zpřesnily a stabilizovaly. Na obr. 42 je vidět vlevo nahoře frekvenční čítač, pod ním se nachází D-klopný obvod 74HC74 a vpravo je umístěný invertor 74HC14, ke kterému jsou připojeny oba oscilátory.



Obr. 43: Fotografie výstupních průběhů, žlutý je z krystalového oscilátoru NE555, modrý je z oscilačního optoelektronického senzoru a fialový je z D-klopného obvodu

Takto realizované zapojení s modulovatelnou laserovou diodou pracující v kontinuálním režimu se dá vylepšit použitím pulzního režimu. Tak byla uvažována i potřeba realizace optoelektronického senzoru pracujícího v pulzním režimu. Tento celý obvod byl navržen i odsimulován.

Experimentálně byla analyzována a simulována možnost pulzního režimu. Při pulzním režimu jde o zúžení délky trvání kladné půlperiody výstupního signálu astabilního multivibrátoru. Délkou trvání pulzu lze měnit citlivost a parametry celého oscilačního optoelektronického senzoru.

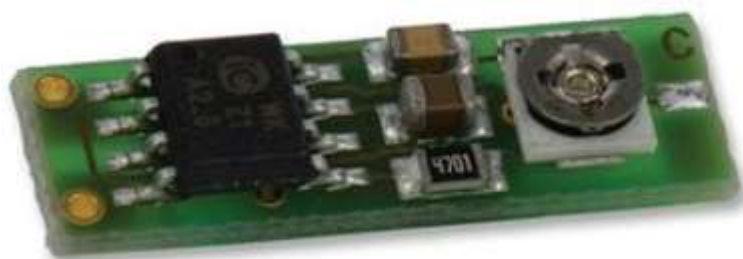


Obr. 44: Celkové schéma zapojení s naměřenými průběhy

2.6 Možnosti zkrácení délky pulzu

2.6.1 Laserový driver

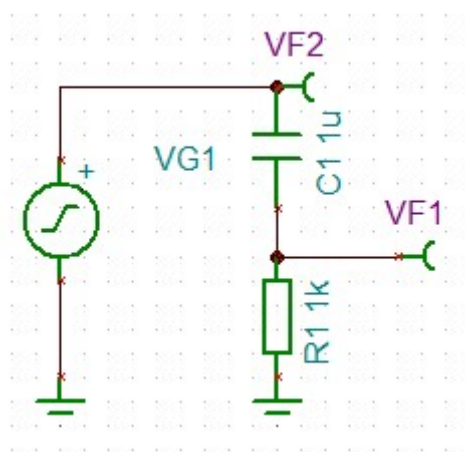
Nejjednodušším řešením by bylo připojit k výstupu **laserový driver**, který je navržený přesně pro tuto potřebu. Avšak tyto drivery jsou hůře dostupné, a ne všechny jsou nastavitelné pro různé délky pulzu.



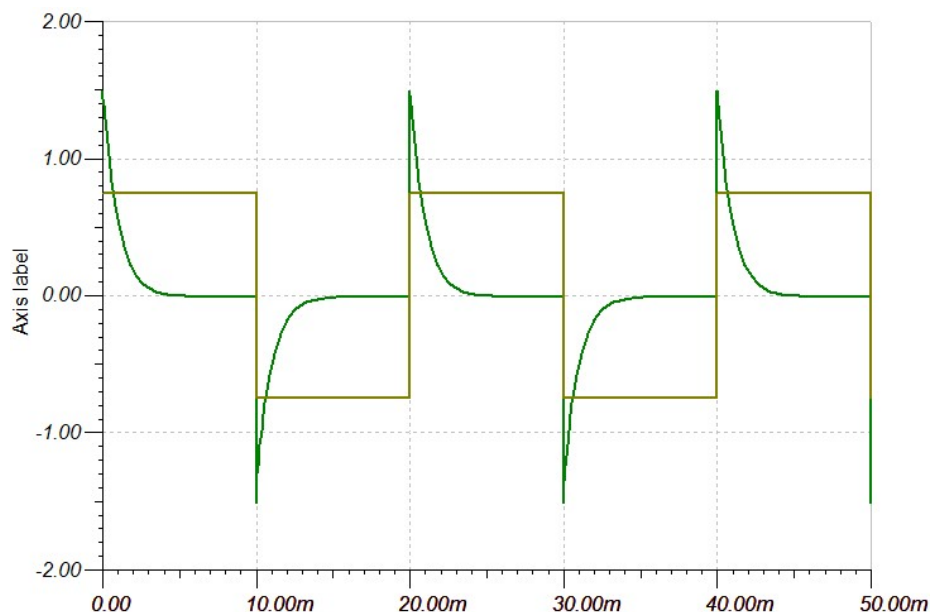
Obr. 45: Ukázka laserového driveru. Převzato z [16]

2.6.2 Derivační RC článek

První možností je použití **derivačního RC článku**. Jde o pasivní spojení kondenzátoru (C_1) a odporu. Zapojení je formou děliče. Tyto dvě součástky, jak už název napovídá, vytváří matematickou operaci derivace vstupního průběhu. Byla provedena simulace chování obvodu v programu TINA-TI.



Obr. 46: Schéma zapojení derivačního RC článku

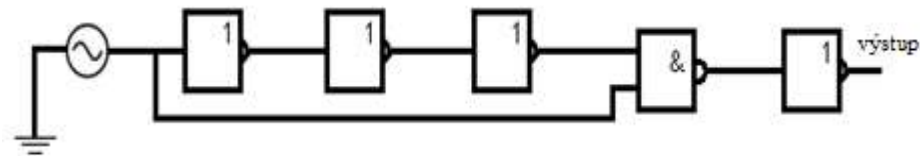


Obr. 47: Simulace chování derivačního članku

Jak vidíme na obr. 47, vstupní obdélkový signál (žlutý průběh) délky trvání 10ms se po průchodu derivačním člankem (zelený průběh) zkrátil na střední hodnotu (pokles na 3dB) cca 710µs. Vhodnou volbou velikostí součástí se mění časová konstanta tohoto obvodu a tím se mění délka zkráceného pulzu. Pro připojení k laserové diodě by byl potřeba odfiltrovat záporný jehličkový pulz například pomocí LED diody nebo usměrňovací diody připojené proti zemi.

2.6.3 Zpoždění na logických hradlech

Další možností je použít zkrácení délky trvání signálu pomocí připojení **logických hradel**, kdy na invertujícím hradle při překlopení vzniká určité časové zpoždění. Při použití jednoho hradla NOT se dá očekávat zpoždění okolo desítek, až stovek nanosekund. Lze využít sériového řazení invertorových hradel za sebe. Tím se docílí snížení délky zpoždění. Za hradla invertoru je nutné vložit NAND hradlo, na jehož prvním vstupu bude signál z generátoru a na druhém vstupu bude zpožděný signál z hradel invertoru. Tento rozposunutý signál přijde na vstupy hradla NAND. V případě že je na obou vstupech na krátkou chvíli logická úroveň H, pak se na výstupu objeví logická úroveň L. Na výstup tohoto hradla připojíme další invertor a získáme signál stejné frekvence jako má generátor, ale se zkrácenými pulzy. Tento obvod se nerealizoval ani se nesimuloval, protože nelze plynule měnit délka zkrácení pulzu. Použitý laser nedokáže sepnout pulz kratší než 200ns a simulační program volně dostupný od firmy Texas Instruments nemá nainstalovanou knihovnu logických hradel.



Obr. 48: Schéma zapojení hradlového zkracovače délky pulzů

2.6.4 Zkrácení pomocí Lenzova zákona

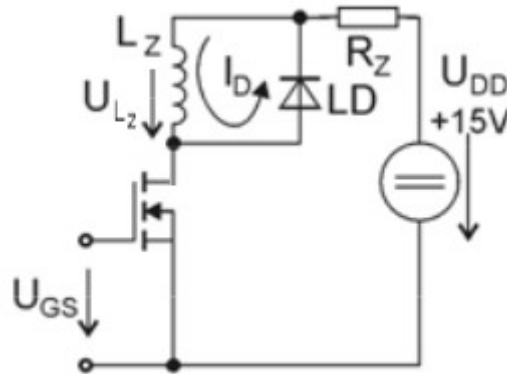
Další možností zkrácení pulzu je možná využitím **Lenzova zákona**. Tento zákon popisuje jev, kdy po odpojení cívky z obvodu je vygenerován časově krátký impulz, který může být využit k čerpání laserové diody.

Princip spínání indukční zátěže

1. Neseprtý stav – na “gate“ unipolárního tranzistoru není přivedeno žádné napětí. Výstupní napětí je rovno napájecímu napětí minus úbytek napětí na cívce.
2. V tomto kroku je přivedeno napětí na “gate“ unipolárního tranzistoru. Při dosažení prahového napětí tohoto tranzistoru se otevře kanál “drain“ a “source“. Při použití indukční zátěži poklesne napětí U_{DS} a strmě vzroste proud I_D . Indukční zátěž působí proti změně proudu.
3. Proud se po určité době ustálí na hodnotě cca 90%. Reálnou velikost definuje napájecí napětí a celkový odpor. Nabíjením se naakumuluje energie (W) vyjádřená vztahem $W = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot L$. Přičemž I je proud procházející cívku a L je indukčnost cívky. Tato naakumulovaná energie je využita při vygenerování napěťového (Lenzova) pulzu, který se dá použít k čerpání laserové diody.
4. V tomto kroku je odpojeno napětí směřující do “gate“ tranzistoru a ten je tímto uzavřen. Strmě poklesne proud tekoucí cívku. Zde Lenzův zákon říká, že se vygeneruje napěťový pulz. Toto napětí má opačný směr, než jaký má změna proudu. Hodnota napětí U_{LZ} se určí pomocí vzorce:

$$U_{LZ} = -L_z \cdot \frac{d_i}{d_t}$$

Přičemž U_{DS} je výstupní napětí cívky, U_{DD} je napájecí napětí, L_z je indukčnost cívky a $\frac{d_i}{d_t}$ je derivace proudu podle času.

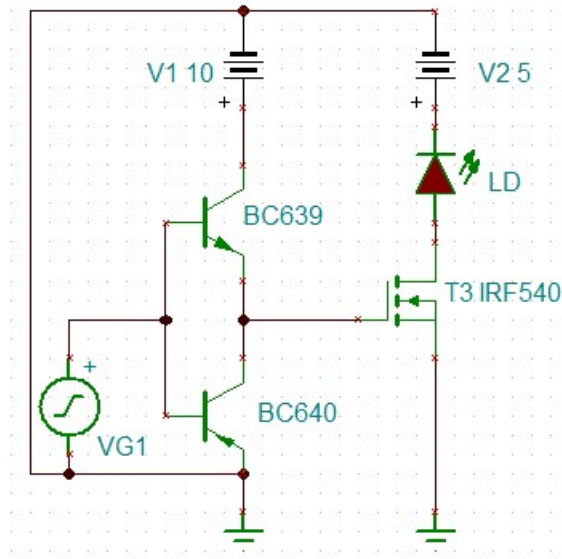


Obr. 49: Schéma spínání indukční zátěže. Převzato z [17], upraveno

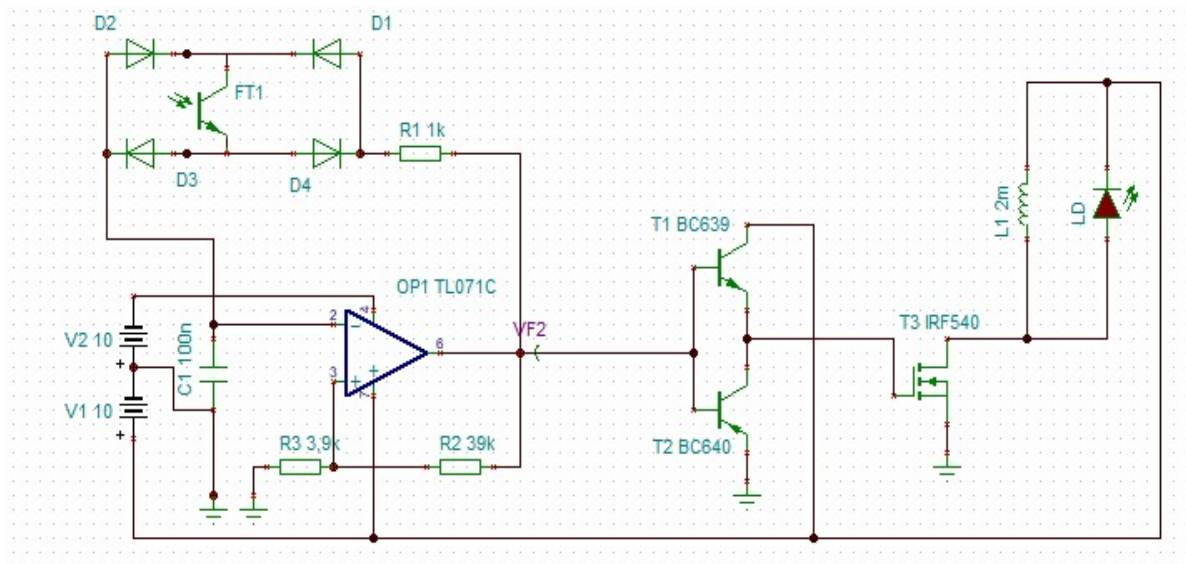
2.7 Oscilační optoelektronický senzor v pulzním režimu

Na základě tohoto zákona byly provedeny experimenty a simulace popsané v další části této bakalářské práce, která se zabývá již zmíněným oscilačním optoelektronickým senzorem, který nyní pracuje v impulzním režimu.

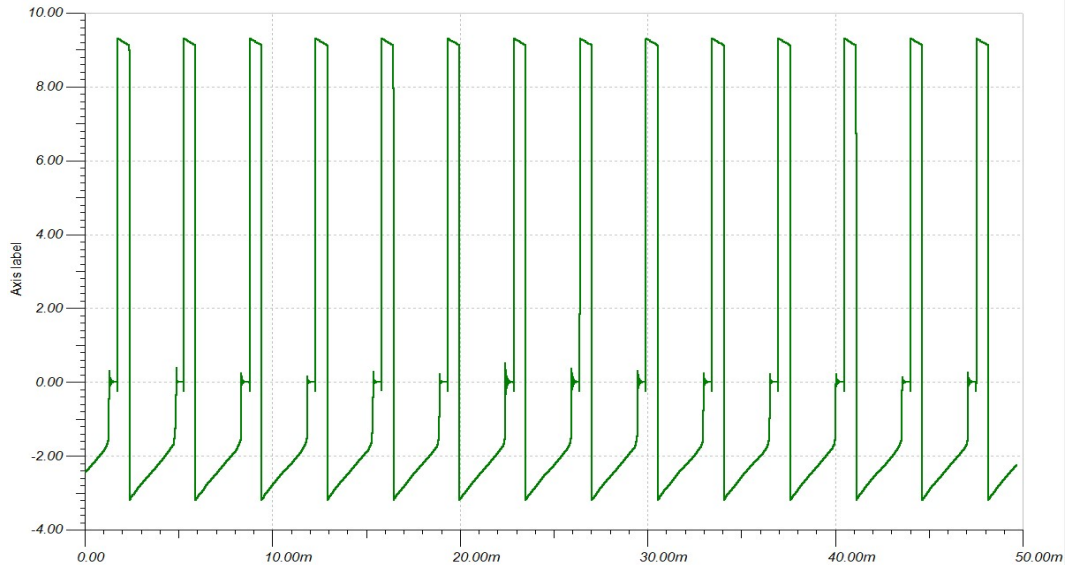
Laserová dioda má větší proudový odběr při čerpání, než kolik je operační zesilovač schopen zajistit. Proto byla potřeba přidat nějaké proudové zesílení výstupu z operačního zesilovače. Zde vznikla možnost přímého připojení MOSFET tranzistoru jako spínače. Ale větší proudový odběr měl špatný vliv na stabilitu celého obvodu a bylo mezi tyto dvě části nutné vložit nějaký typ proudového zesilovače. Tak byl za operační zesilovač připojen proudový komplementární zesilovač a unipolární MOSFET tranzistor. Komplementární proudový zesilovač je tvořený dvojicí bipolárních tranzistorů, jeden je typu NPN a druhý je typu PNP. Tranzistor typu NPN byl zvolen BC639. Uvedený tranzistor je spínáný pomocí kladné půlperiody a propojí přechod mezi kolektorem a emitorem, kde po dobu trvání kladné půlperiody prochází kolektorové napětí, a přivedením napětí na vstup (“gate“) se otevře výkonový MOSFET tranzistor. Tranzistor PNP má označení BC640. Přivedením záporné půlperiody se otevře obvod mezi emitorem a kolektorem, kde je připojený zemnicí vodič, a přivedením zemnění na vstup (“gate“) MOSFET tranzistoru se tento tranzistor uzavře. MOSFET tranzistor v experimentu je použit IRF540. Laserová dioda byla použita QLD-810-100S. [17]



Obr. 50: Řízení výkonového MOSFET tranzistoru pomocí proudového zesilovače

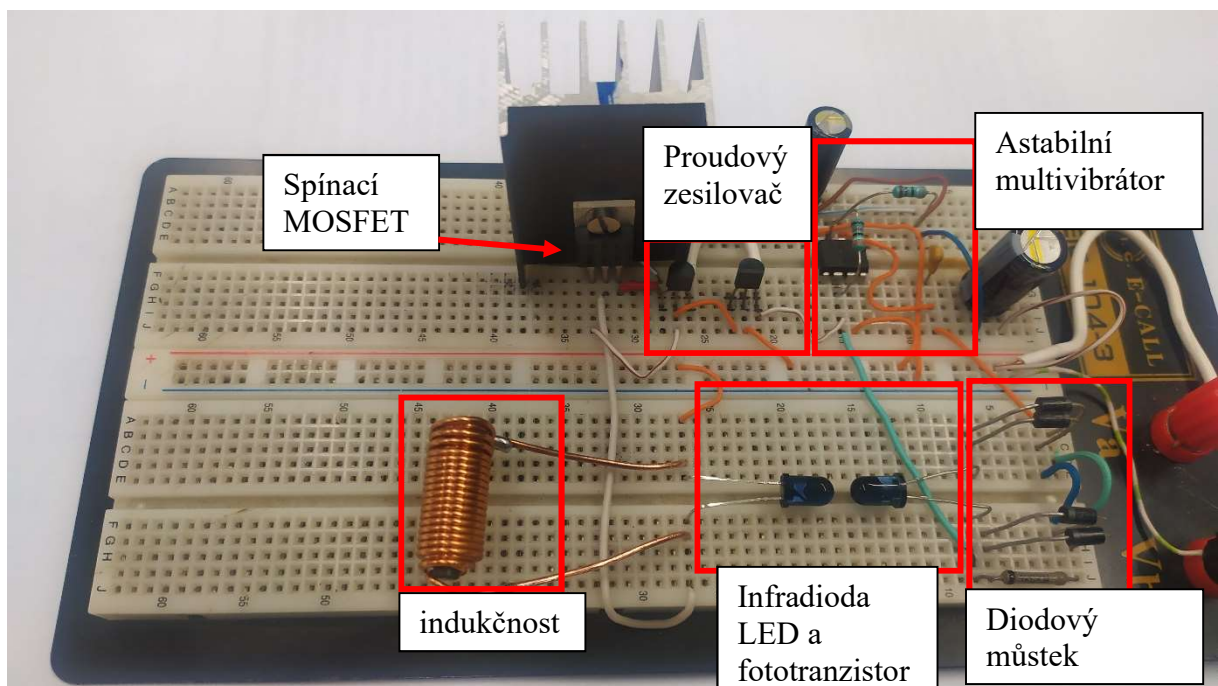


Obr. 51: Oscilační optoelektronický senzor v pulzním režimu

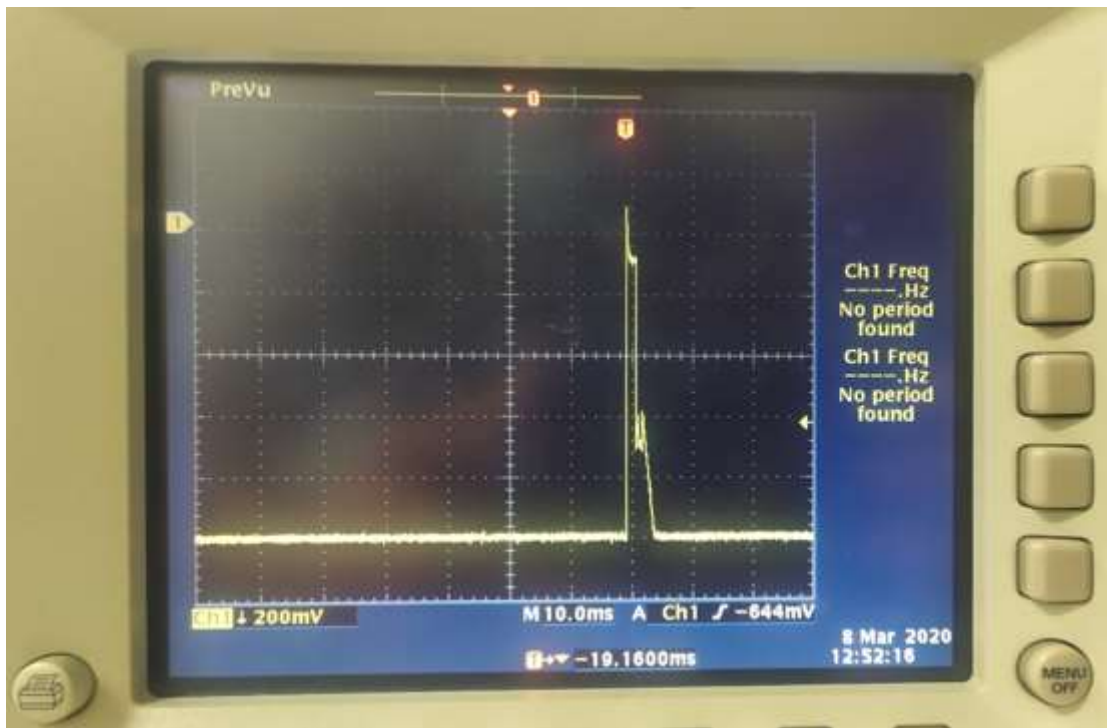


Obr. 52: Simulace průběhu pulzů z cívky

Kladná část průběhu zobrazeného v grafu jsou znázorněním vygenerovaných napěťových pulzů z indukčnosti. Záporná část pulzů v grafu je průběh nabíjení indukčnosti. Hodnotou indukčnosti se dá lehce měnit délka trvání pulzů, ale dá se také změnit typem cívky. Například když má cívka železné nebo feritové jádro, má větší setrvačnost při vybíjení. Tím pádem je kladná část pulzu delší. V experimentu je použita vzduchová cívka navinutá na plastovém prstenci a má indukčnost změřenou na 0,980mH. Při experimentech byla použita led dioda, která přímo osvětlovala fototranzistor.



Obr. 53: Fotografie impulzního oscilačního optoelektronického senzoru



Obr. 54: Fotografie pulzu cívky zobrazená na osciloskopu

Závěr

V teoretické části byly popsány různé typy a konstrukce optických vláknových senzorů, dále funkci operačního zesilovače, různé typy a dělení zpětných vazeb a optoelektronickou zpětnou vazbu. Zaměřil jsem se rovněž na funkci laseru a základní parametry optického vlákna.

V praktické části je popsána a zrealizována konstrukce celého senzoru v kontinuálním režimu a obohacená varianta zobrazení frekvenční odchylky při působení na senzor. Uvedená konstrukce optoelektronického vláknového senzoru s optickou zpětnou vazbou představuje modelovou konstrukci, která je plně funkční, dá se na ní demonstrovat a popsat všechny klíčové části. Pro snadné odladění a pochopení funkce tohoto obvodu jsem pracoval v akustickém pásmu a poté jsem přizpůsobil výstupní frekvenci na stejnou hodnotu jakou má etalon. Princip tohoto zapojení umožňuje snadný přechod i k vyšším frekvencím. V našem případě je mezní frekvence limitovaná modulační frekvencí použitého laseru.

Rovněž jsem uvedl možnost konstrukce podobného typu senzoru, který ale pracuje v pulzním režimu. Cílem práce nebyla potřeba kvantifikovat naměřené výsledky senzoru.

Jako další možné vylepšení bych zvolil frekvenčně laditelný etalon, počítačové zpracování výstupního průběhu a kvantifikaci dat pomocí počítačového programu.

Literatura

[1] TURÁN, J. a S. PETRÍK. Optické vláknové senzory. Bratislava, 1990. ISBN 80-05-00655-1.

[2] BELZA, Jaroslav. Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.

[3] MIŠEK, Ján, Josef KORTÁN a Ladislav KUČERA. Polovodičové zdroje optického záření. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. Polovodičová technika.

[4] Příspěvatelé WikiSkript, Typy laserů [online], c2018, Datum poslední revize 15. 04. 2018, [citováno 4. 06. 2020]

<https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Typy_laser%C5%AF&oldid=403619>

[5] Mgr. Michal LUKÁŠ, Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod [online], Vytvořeno dne 1.10.2001 [citováno 4. 06. 2020]

<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>>

[6] Mgr. Michal LUKÁŠ, Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod [online], Vytvořeno dne 21.11.2001, [citováno 4. 06. 2020]

<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>>

[7] Mgr. Michal LUKÁŠ, LASEROVÉ DIODY 3 - Parametry laserových diod a jejich měření [online], Vytvořeno dne 2.5.2002, [citováno 4. 06. 2020]

<<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>>

[8] Příspěvatelé Wikipedie, Optické vlákno [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2020, Datum poslední revize 4. 06. 2020, [citováno 4. 06. 2020]

<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno&oldid=18597581>

- [9] YARIV, Amnon a Pochi YEH. Photonics: optical electronics in modern communications. 6th ed. New York: Oxford University Press, 2007. ISBN 0-19517-946-3.
- [10] SOCHOR, Václav. Optické, elektrodynamické a nelineární vlastnosti optických vláken. Praha: Academia, 1986. Studie ČSAV.
- [11] WAIT, John V., Lawrence P. HUELSMAN a Granino Arthur KORN. Introduction to operational amplifier theory and applications. New York: McGraw-Hill, c1975. ISBN 0-07-067765-4.
- [12] STENGL, Jens Peer a Jenő TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-54-6.
- [13] Prof. Ing. Jaroslav Boušek CSc., Optoelektronické součástky [online], Vytvořeno 1982, [citováno 4. 06. 2020]
<<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/eso/prvky8x.pdf>>
- [14] PHILIPS [NXP Semiconductors], 74HC14 Datasheet(PDF) 1 Page - NXP Semiconductors [online], Vytvořeno 30. 09. 2003, [citováno 4. 06. 2020]
<<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/112419/PHILIPS/74HC14.html>>
- [15] ONSEMI [ON Semiconductor], 74HC74 Datasheet(PDF) 1 Page - ON Semiconductor [online], Vytvořeno 02. 2007, [citováno 4. 06. 2020]
<<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/171829/ONSEMI/74HC74/215/1/74HC74.html>>
- [16] LASER COMPONENTS, iC-WK2D LASERDIODE DRIVER PCB FOR N-TYPE LASERDIODES, [online], Vytvořeno dne 18. 02. 2010, [citováno 4. 06. 2020]
<<https://docs.rs-online.com/ecc6/0900766b80e0f945.pdf>>
- [17] FOIT, Julius, Jan VOBECKÝ a Vít ZÁHLAVA. Elektronika: laboratorní cvičení. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03130-6.

[18] Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady [online], Vytvořeno dne 11. 04 .2005, [citováno 4. 06. 2020]

[https://is.muni.cz/el/1441/jaro2007/Fy2BP_ENKA/um/OZEEL11.pdf]

[19] Václav Kotora. Vyhodnocení kmitočtové diference, Vytvořeno 15. 09. 2005, [citováno 4. 06. 2020], Západočeská univerzita v Plzni

Seznam obrázků a fotografií

Obr. 1: Principiální schéma zapojení prvního typu OVS	10
Obr. 2: Principiální schéma druhého typu OVS	10
Obr. 3: Schématická značka operačního zesilovače	12
Obr. 4: Znázornění operačního zesilovače jako dvojbranu	13
Obr. 5: Obecné schéma operačního zesilovače se zapojenou zpětnou vazbou	14
Obr. 6: Obecně zobrazené zapojení sériové (vlevo) a paralelní zpětné vazby (vpravo)	15
Obr. 7: Obecně zobrazené zapojení napěťové a proudové zpětné vazby	16
Obr. 8: Kladná zpětná vazba použitá v zapojení komparátoru s hysterezí. Převzato z [18]	17
Obr. 9: Záporná zpětná vazba použitá v invertujícím zesilovači. Převzato z [18]	18
Obr. 10: Model absorpce záření. Převzato z [5]	20
Obr. 11: Model absorpce a spontánní emise záření. Převzato z [5]	20
Obr. 12: Model stimulované emise záření. Převzato z [5]	21
Obr. 13: Pouzdro laserové diody. Převzato z [5]	22
Obr. 14: VACH laserové diody. Převzato z [5]	23
Obr. 15: Srovnání spektra polovodičových zdrojů záření. Převzato z [7]	23
Obr. 16: Typy optických vláken. Převzato z [8], upraveno	24
Obr. 17: Astabilní multivibrátor s operačním zesilovačem	26
Obr. 18: Fotografie experimentální realizace oscilačního optoelektronického senzoru	27
Obr. 19: Zpětnovazební můstek s fototranzistorem	27
Obr. 20: Graf vstupního napětí (vlevo) a výstupního napětí (vpravo), ($U_2 < U_1$)	28

Obr. 21: Výstupní průběh napětí operačního zesilovače (zeleně).....	29
a průběh napětí na kondenzátoru (červeně).....	29
Obr. 22: Fotografie spektra výstupního signálu oscilačního optoelektronického senzoru.....	30
Obr. 23: Schématická značka fototranzistoru.....	30
Obr. 24: Zjednodušený průřez planárně vyrobeným fototranzistorem. Převzato z [13].....	30
Obr. 25: VACH fototranzistoru. Převzato z [3], upraveno.....	31
Obr. 26: Schéma pro měření VACH	31
Obr. 27: Výstupní průběh oscilačního obvodu optoelektronického senzoru (modrý) a průběh signálu laserového svazku dopadajícího na fototranzistor z optického vlákna, nasnímaný sondou s PIN diodou (zelený)	32
Obr. 28: Zpětnovazební senzorická cívka s optickým vláknem.....	33
Obr. 29: Fotografie navázání optického svazku do optického vlákna.....	34
Obr. 30: Katalogový list laserové diody FP-SMA-650-30M-1MHz.....	35
Obr. 31: Fotografie sestaveného frekvenčního čítače	36
Obr. 32: Schéma zapojení krystalového oscilátoru s NE555	37
Obr. 33: Fotografie fyzické realizace krystalového oscilátoru s NE555.....	38
Obr. 34: Výstupní průběh krystalového oscilátoru NE555 (žlutý průběh)	38
Invertovaný průběh krystalového oscilátoru NE555 (fialový průběh).....	38
Obr. 35: Hysterezní charakteristika obvodu 74HC14. Převzato z [14].....	39
Obr. 36: Schématická značka a rozložení vývodů pouzdra DIP14. Převzato z [14].....	40
Obr. 37: Fotografie invertovaného pulzu (fialový průběh) ze snímače (modrý průběh)	40
Obr. 38: Rozložení vývodů pouzdra DIP14 obvodu 74HC74. Převzato z [15]	41

Obr. 39: Obecný průběh závislosti výstupního průběhu (Q) na vstupních průbězích (D a CLK). Převzato z [19]	41
Obr. 40: Pravdivostní tabulka 74HC74. Převzato z [15].....	42
Obr. 41: Realizace frekvenčního rozdílu na nepájivém poli	42
Obr. 42: Realizace diferenčního obvodu na pájivém poli s připojeným čítačem frekvencí.....	43
Obr. 43: Fotografie výstupních průběhů, žlutý je z krystalového oscilátoru NE555, modrý je z oscilačního optoelektronického senzoru a fialový je z D-klopného obvodu	43
Obr. 44: Celkové schéma zapojení s naměřenými průběhy	44
Obr. 45: Ukázka laserového driveru. Převzato z [16]	45
Obr. 46: Schéma zapojení derivačního RC článku.....	45
Obr. 47: Simulace chování derivačního článku.....	46
Obr. 48: Schéma zapojení hradlového zkracovače délky pulzů	47
Obr. 49: Schéma spínání indukční zátěže. Převzato z [17], upraveno	48
Obr. 50: Řízení výkonového MOSFET tranzistoru pomocí proudového zesilovače	49
Obr. 51: Oscilační optoelektronický senzor v pulzním režimu	49
Obr. 52: Simulace průběhu pulzů z cívky	50
Obr. 53: Fotografie impulzního oscilačního optoelektronického senzoru	50
Obr. 54: Fotografie pulzu cívky zobrazená na osciloskopu	51

Seznam příloh

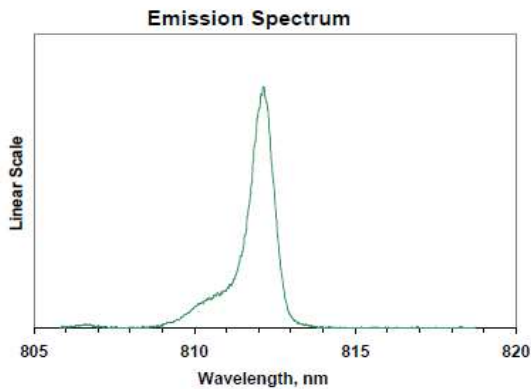
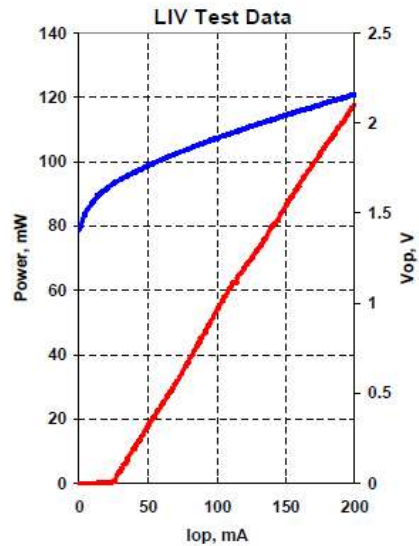


QPHOTONICS, LLC

1435 Crossways Blvd Phone: 757-213-0560
 Ste: 101 FAX: 757-213-0563
 Chesapeake, VA 23320 E-mail: info@qphotonics.com
 USA http://www.qphotonics.com

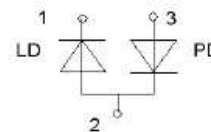
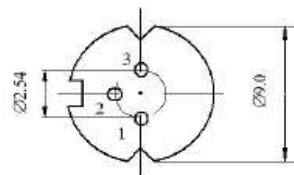
MODEL	QLD-810-100S
PART NUMBER	SAMPLE

Parameter	Value	Units
Internal Temperature	25	°C
Optical Output Power	100	mW
Threshold Current	28	mA
Operating Current	170	mA
Operating Voltage	2.1	V
Monitor Current	1.75	mA
Monitor Dark Current	0	nA
Center Wavelength	812	nm
Spectral Width	0.83	nm



Pin	Connection
1	LD Cathode
2	LD Anode, PD Cathode
3	PD Anode

Operator	HS
Date	8/13/2004



BOTTOM VIEW