



## **Středoškolská technika 2013**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

### **Charakterizace diodových laserů v blízké IČ oblasti**

**Lucie Brichová**

První soukromé jazykové gymnázium Hradec Králové,  
Brandlova 875, Hradec Králové

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracovala samostatně, použila jsem pouze podklady (literaturu, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Libníkovcích dne 1. ledna 2013

.....  
Lucie Břichová

## **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat Mgr. Ondřeji Votavovi, Ph.D. za otevření nového světa fyziky, věnovaný čas, rady a především trpělivost při vzniku této práce. Poděkování patří i mé vedoucí práce Mgr. Ladě Kacálkové, Ph.D. za cenné připomínky a metodické vedení.

V Libníkovcích dne 1. ledna 2013

Lucie Brichová

## **Anotace**

V práci jsou popsány charakteristiky diodového laseru s vnějším rezonátorem. Obsažená data a výsledky byly získány v rámci vědecké stáže Otevřená věda III pořádané Akademií věd České republiky. Je zde popsána stavba konkrétního použitého laseru, jeho základní principy a charakteristiky, způsoby nastavování a metody přeladování. Praktickým výstupem práce jsou grafy zobrazující charakteristiky tohoto laseru, které mohou napomoci k pochopení jeho principu fungování. U měření jsou popsány podmínky průběhu, zapojení zařízení a jejich názorné schéma. Je poskytnuto i bližší seznámení s použitým materiálem a měřicím zařízením. Tyto poznatky budou moci být posléze použity k vylepšení použitých komponentů zmíněného laserového zařízení.

**Klíčová slova:** diodový laser; spektroskopie; blízká IČ oblast; vnější rezonátor

## **Annotation**

This paper describes characteristics of external cavity diode laser. Contained data and results were measured within the frame of Otevřená věda III scientific internship at J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry of the Academy of Sciences of the Czech Republic. Structure of a laser, its basic principles and characteristics, ways of configuring and methods of tuning are described in the paper. Practical outputs of the paper are graphs with these characteristics which can help to understand the principles of a laser operation. There is also showed conditions of process, assembly of the device and its schematics. The paper afforded focus to used material and measuring device. These findings can be used for the improvement of the components and functionality of the laser device.

**Keywords:** diode laser; spectroscopy; near IR area; external cavity

# Obsah

---

1	Obecný úvod a motivace .....	7
2	Teoretická část práce .....	8
2.1	Historie a současnost.....	8
2.2	Základní pojmy .....	10
2.3	Interakce mezi hmotou a světlem.....	12
2.4	Optický rezonátor.....	14
2.5	Laser.....	15
2.6	Diodové lasery .....	16
2.7	Littrowovo uspořádání .....	17
2.8	Použití diodových laserů ve spektroskopii.....	18
3	Praktická část práce .....	19
3.1	Měření proudových charakteristik .....	19
3.2	Měření přeladovacího rozsahu .....	22
3.3	Výsledky .....	24
3.3.1	Proudové charakteristiky .....	24
3.3.2	Přeladovací rozsah laseru.....	27
3.4	Vyhodnocení výsledků.....	30
3.4.1	Proudové charakteristiky .....	30
3.4.2	Přeladovací rozsah laseru.....	33
4	Diskuse .....	35
5	Závěr.....	36
6	Bibliografie.....	37
7	Přehled obrázků .....	38
8	Přehled tabulek .....	38
9	Přehled grafů.....	39
10	Seznam použitých značek.....	39

# 1 Obecný úvod a motivace

---

Člověk má několik smyslů, s nimiž vnímá svět kolem sebe. Jedním z nich je zrak, základní nástroj této práce. Vnímáme s ním světlo, které nám umožňuje nejen najít kliku od dveří, ale za určitých podmínek i nahlédnout až do nitra atomu nebo jim řezat materiály. Těmito podmínkami rozumíme jeho usměrňování a zesilování až na podobu laseru.

V rámci vědecké stáže Otevřená věda III pořádané Akademií věd České republiky jsem se mohla zapojit do vědeckého výzkumu, ve kterém se využívá tohoto zařízení. Mým úkolem je stanovit charakteristiky chování, popsat oživování a nastavování konkrétního laseru používaného při výzkumu molekuly amoniaku. Oblast, ve které laser pracuje, se nazývá blízká infračervená oblast, neboli zkratkou, blízká IČ oblast.

## 2 Teoretická část práce

---

### 2.1 Historie a současnost

---

Vynález laseru a jemu podobných zařízení je bezesporu důležitý milník v dějinách. Předcházelo mu několik převratných objevů, které i ovlivnily život mnohých z nás.

S pozorováním základních principů, které jsou dnes pro fungování laseru nezbytné, se můžeme setkat již během doby před naším letopočtem. Starověké badatele Euklida a Ptolemaia zajímal lom světla, který především zkoumali prostřednictvím čoček a zrcadel. Do řady dalších pozorovatelů světla a jeho chování řadíme Alhazena, který i jako první popsal detailně lidské oko, Francise Bacona, považovaného za prvního vědce v současném smyslu, ale také Isaaca Newtona, který je obecně znám spíše pro jeho mechanické zákony, avšak je tím, kdo prvně objevil a popsal barevné spektrum lomem světla na optickém hranolu (Šiňor, 1998).

Novověcí vědci již ke svému výzkumu nepoužívali pouze zrcadel, ale bádali také pomocí matematiky. S ní dokázali proniknout až k teoriím v nichž se jednalo o objekty lidskému oku neviditelné.

Angličan James Clerk Maxwell věnoval své tři práce teoretickým základům klasické elektrodynamiky. Třetí názvu „*Dynamická teorie elektromagnetického pole*“, kterou publikoval roku 1865, zformulovala první rovnice vyjadřující vzájemnou závislost elektrických a magnetických polí. Vzájemné ovlivňování těchto polí, u něhož jakákoliv slabá změna elektrického nebo magnetického pole vede ke vzniku elektromagnetické vlny šířící se následně prostorem. Toto šíření je přesně totožné s rychlostí světla ve vakuu.

Gustav Kirchhoff založil na poznatku vztahu mezi emisí a absorpcí světla spektrální analýzu látek a definoval pojem černého tělesa. Následující zákony o vyzařování černého tělesa měly jisté nedostatky, které se podařilo odstranit až Maxu Planckovi předpokladem, že energie přijímaná a vyzařovaná černým tělesem není libovolná, nýbrž je kvantovaná. Každému tomuto kvantu přiřadil úměrnou frekvenci a podle té sestavil rovnici určující energii kvanta záření (Von Laue, 1969).

Roku 1905 Albert Einstein uvedl v práci „*O jednom heuristickém hledisku týkajícím se vzniku a transformace světla*“, že „... energie svazku vycházejícího z některého bodu se nešíří nepřetržitě ve stále vzrůstajícím objemu, ale skládá se z konečného počtu nedělitelných kvant energie, lokalizovaných v prostoru, pohlcovaných a vyzařovaných pouze v celku.“ Z toho víme, že celá energie, která je elektronem získána, je dodávána světlem v podobě



určitého množství, a to závisí na vlnové délce světla. Následně roku 1916 v další práci „*Emise a absorpce světla podle kvantové teorie*“ poukázal jako první na možnost spontánní a i stimulované emise, jež se stala základním principem kvantové elektroniky (Strumban, 1989). V roce 1928 Rudolph Landenburg a Hans Kopferman svými experimenty dokázali existenci stimulované emise (Hábovčík, 1989).

Na základě těchto všech poznatků byl v roce 1952 popsán princip fungování maseru – mikrovlnného kvantového generátoru, který byl posléze později roku 1960 sestaven. Tento přístroj funguje na podobném principu jako laser, avšak v mikrovlnné oblasti elektromagnetického záření (Vrbová, 1994). Ve stejném roce byl zároveň i poprvé sestaven laser. Jako krystal tohoto pevnolátkového iontového laseru byl použit rubín. Ten má tři energetické hladiny používané pro jeho čerpání. Jeho účinnost je ale poměrně malá – méně než 1% (Vrbová, 1994). V krystalu se většina energie rozptýlí do formy tepla, a proto při jeho používání je nezbytné chlazení. Po jeho sestavení se v následujících letech rychle rozrostl počet nových druhů laserů. Rubínový laser byl dlouho používán v lékařství nebo k vrtání tvrdých materiálů.

Československo patřilo mezi první země, které se zapojily do výzkumu laserových technologií. Únoru 1962 na brněnské Vojenské akademii Antonína Zápotockého byl spuštěn první československý čpavkový maser a o pár měsíců později na Fyzikálním ústavu ČSAV první laser s neodymovým sklem (Strumban, 1989).

Dnešní aplikace laserů je široká. Od využívání jako pomocného záření při termojaderné reakci, tak i v astronomii (pro měření kosmických vzdáleností s přesností milimetru), v geodézii (určení tvaru zemského geoidu s přesností na centimetr), v geofyzice (měření pohybů kontinentů), v lékařství (řezání a vypalování živých tkání, oftalmologie, laserové skalpely), v meteorologii (stanovení spodní hranice oblačnosti, zkoumání horních vrstev atmosféry, určení dohlednosti a hustoty mraků), v mikroelektronice (značkování materiálů, rýhování, žíhání), pro ničení balistických raket v první fázi letu apod. (Vrbová, 1994). V průmyslu je především ceněn pro jeho výkon a spolehlivost, s čímž je i spojené snížení výrobních nákladů (Chmelíčková, 2012).

Pomocí laseru lze i definovat jednotky soustavy SI. Zde byl díky němu metr předefinovaný jako vzdálenost, kterou projde světlo ve vakuu za  $1/299\,782\,458$  zlomků sekundy (Vrbová, 1994).

Lasery, kterých se tato práce týká, jsou konkrétně používány pro výzkum spektrálních čar amoniaku  $\text{NH}_3$ .

## 2.2 Základní pojmy

---

Aby bylo možné porozumět textu, je nutné popsat několik základních termínů a jevů. Jako první, který lze pokládat za jeden z nejpodstatnějších je **světlo**. To se chápe jako **elektromagnetické záření** projevující se dvojí povahou – elektrickou a magnetickou (Hamar, 2012). Toto záření existuje jako vlnění jednotlivých kmitů prostorem. Jednotlivé vlny jsou měřeny pomocí veličiny vlnové délky. Vlnová délka záření je měřena v jednotkách metrů, pro spektroskopické účely se ale používají nanometry (nm).

Nejmenší kvantum elektromagnetického záření je velmi specifická elementární částice - **foton**. Ačkoliv je znázorňován jako koule, nemá určitý tvar, jeho hmotnost je nulová a ani nelze přesně určit, kde se právě nachází (Vrbová, 1994). Rychlost fotonu (neboli elektromagnetických vln) ve vakuu se označuje jako rychlost světla.

**Vlnová délka** je vzdálenost dvou maxim amplitud vlnění o stejné fázi. Značí se písmenem lambda ( $\lambda$ ) malé řecké abecedy (Engst, 1989). Počet vln za jednotku času je označována jako **frekvence**. Vlnovou délku lze určit podle rovnice:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu ( $\sim 3 \cdot 10^8$  m.s<sup>-1</sup>) a  $f$  je frekvence.

Obrácenou hodnotou vlnové délky je **vln počet**. Ten udává počet vln na jednotku délky. Její nejčastěji používanou jednotkou ve spektroskopii je reciproký centimetr cm<sup>-1</sup> (Vrbová, 1994).

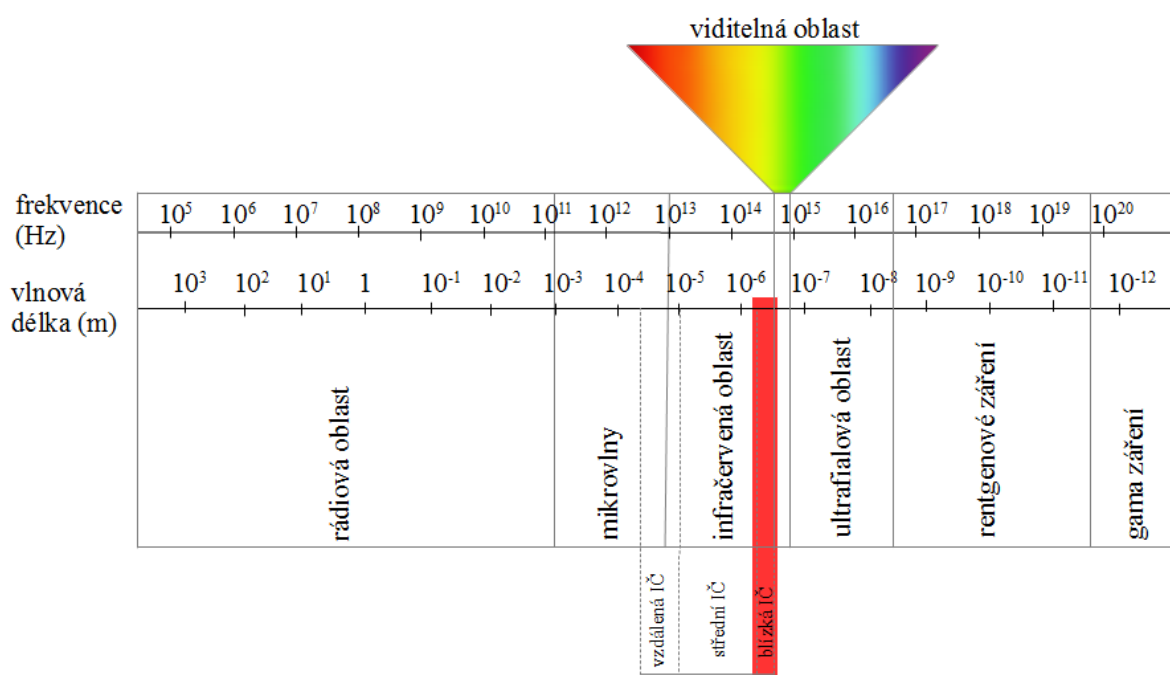
Lidské oko je citlivé na elektromagnetické záření o vlnové délce 390 – 760 nm. Toto záření je označováno jako **viditelné světlo**. Šíří se ze zdroje přímočaře do okolního prostoru. Jednotlivé paprsky se mohou protínat, ale neovlivňují se. Mezi základní vlastnosti světla patří lom, odraz, polarizace (směr vlnění) a interference. **Interference světla** je pojem, který označuje jeho skládání při určitých podmínkách. Tyto paprsky musí mít stejnou frekvenci, být navzájem rovnoběžné a mít na sobě nezávislý dráhový rozdíl. V závislosti na tomto dráhovém rozdílu se skládáním vln jeho intenzita buď zvyšuje nebo snižuje (Jandora, 2000). V prvním případě je hovořeno o konstruktivní a ve druhém o destruktivní interferenci. Pokud se rozdíl optických drah rovná  $m$ -násobku vlnové délky dopadající na povrch optického prvku, mluví se o  $m$ -tém řádu interference (Vrbová, 1994).

Viditelné světelné spektrum se skládá ze sedmi barev, které mezi sebou plynule přecházejí. Z jedné strany červená část spektra navazuje na infračervenou oblast (viz. Obrázek

1) a postupuje přes oranžovou, žlutou, zelenou, azurovou, modrou a fialovou k ultrafialové oblasti. Lze ho tak rozkládat pomocí optického prvku (hranolu nebo difrakční mřížky) na svazky dané vlnové délky záření (Vrbová, 1994).

V přírodě je nejrozšířenější **infračervené záření** o vlnové délce 760 nm – 1mm. Už jenom díky Slunci, jehož energie je vyzařována v této oblasti, nebo z žárovky či obloukové lampy, kde tvoří téměř 90% energie. Pouze vysoce citlivé detektory můžou zjistit toto jinak člověku neviditelné záření. Avšak některé druhy plazů nebo hmyzu jsou schopny ho sami identifikovat a využít k lovu potravy i v úplné tmě (Strumban, 1989).

Zkoumaný laser vyzařuje na vlnových délkách v této spektrální oblasti, specificky – blízké infračervené oblasti. Nazývá se tak z důvodu návaznosti jejich vlnových délek na člověku blízkou škálu viditelného světla. Na Obrázku 1 je znázorněna spolu s dalšími oblastmi elektromagnetického záření.



Obrázek 1 - Spektrum elektromagnetického záření s červeně označenou blízkou infračervenou oblastí

Dalším neméně důležitým pojmem je **polarizace světla**. Je to vlastnost popisující orientaci vlny a směr jejího šíření. Polarizované světlo je takové, které pravidelně opisuje uzavřenou křivku. Tato vlastnost se projevuje v různých stavech, například: lineární polarizaci v horizontální rovině, lineární polarizaci ve vertikální rovině, kruhově levotočivou polarizaci, nebo pravotočivou polarizaci (Vrbová, 1994).

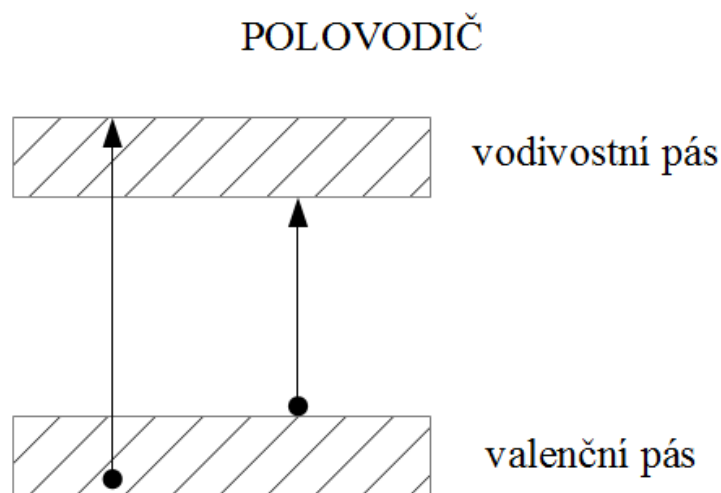
## 2.3 Interakce mezi hmotou a světlem

---

Atom a molekuly obsahují elektrony na různých energetických hladinách nebo pásech, které se v případě atomů značí vzestupně číslicemi (př.  $n=1, n=2, \dots$ ) nebo abecedně. Zároveň vzestupně stoupá i jejich energie. Zde jsou umístěny, dokud nedojde ke změně podmínek. Fungování laseru závisí na jejich přesunu z vyšší energetické hladiny do nižší. Tomuto jevu se říká **emise**. Při sestupu na nižší hladinu se právě uvolňuje jeden foton. Pokud je emise vyvolaná dopadem jiného fotonu, nazýváme ji stimulovaná emise. Právě proces stimulované emise je klíčový pro vznik laserového záření.

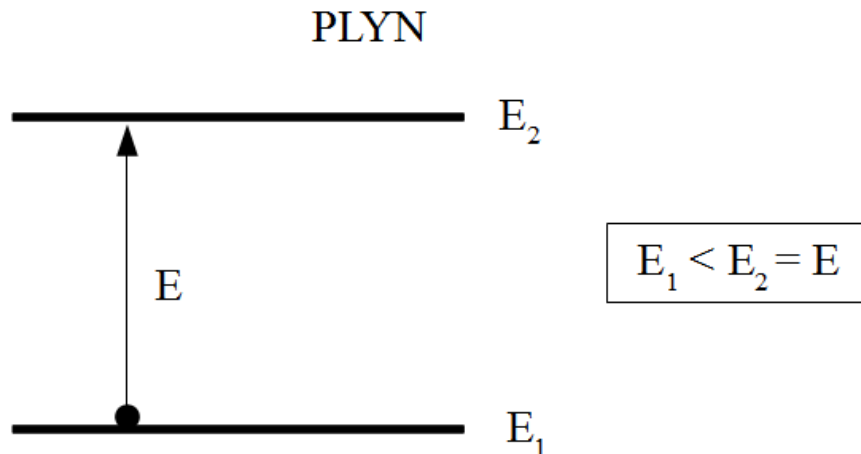
Při opačném ději – **absorpci**, je foton elektronem pohlcen a díky této světelné energii vybuzen (excitován) na vyšší hladinu nebo pásmo.

V látkách pevné fáze se navzájem ovlivňují energetické pásma rozšířených hodnot energií – v polovodičích se jedná o takzvané **vodivostní** a **valenční pásy**, mezi kterými se nachází **zakázaný pás** (Hábovčík, 1989). Elektron potřebuje pro přechod do vyššího pásma energii odpovídající šířce zakázaného pásu nebo vyšší. Pokud energie není dostatečná, přechod neproběhne. Na následujícím Obrázku 2 jsou znázorněny tyto energetické pásy polovodiče.



Obrázek 2 – Energetické pásy v polovodiči

Elektrony látek v plynné fázi se naproti tomu nacházejí v konkrétních přesně definovaných energetických hladinách. Zde pro absorpci platí, že elektron potřebuje získat přesně energii, jakou má hladina, na kterou vstupuje. Viz. Obrázek 3.



Obrázek 3 – Energetické hladiny v plynu

Při dopadu na těleso se záření buď může pohltit, nebo odrazit. Každé těleso zároveň vyzařuje tepelné záření. Pro pochopení energie fotonů je nutno se seznámit s Planckovým zákonem a zavést specifický model tzv. černého tělesa, které dokonale pohlcuje veškerou energii a žádnou neodráží (Vrbová, 1994). Sochor (1990) uvádí tento převratný Planckův předpoklad: „Elektromagnetické vlny mohou nést jen určitou energii, která je násobkem specifického množství energie.“ Právě proto podle tohoto poznatku o nutnosti energie být v kvantech, a ne libovolném množství známe rovnici, která udává energii kvanta záření, fotonu:

$$E = h \cdot f = \frac{(h \cdot c)}{\lambda} \quad (2)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta ( $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s),  $f$  je frekvence,  $\lambda$  je vlnová délka,  $c$  je rychlost světla ve vakuu.

Planckova konstanta je jedna ze základních fyzikálních konstant, která je součinitelem úměrnosti mezi energií kvanta záření a jeho frekvencí (Vrbová, 1994).

Na základě těchto poznatků je založena **spektrální analýza**. Pomocí ní se zjišťuje složení látek na díky interakci jejich částic s fotony. Využívá se spektrografu, který zaznamenává množství fotonů při dané frekvenci po proběhnutí absorpce nebo emise. Tím se získává spektrum zkoumané látky, skládající se ze spektrálních čar či spektrálních pásů. Jejich pozice (vlnová délka) závisí na energii přechodů mezi hladinami (Kanický, 2009).

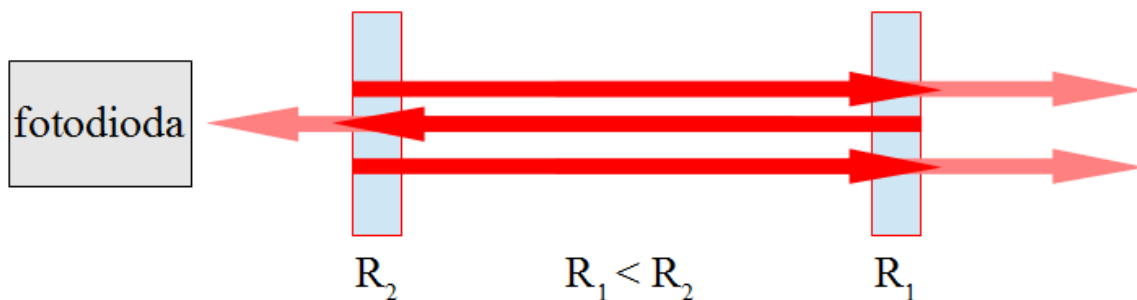
## 2.4 Optický rezonátor

---

Optický rezonátor je jednou ze základních součástí každého laseru. Díky konstruktivní interferenci – skládání vln – v něm dochází ke zvýšení intenzity záření pro některé vlnové délky. V tomto případě pomáhá zesilování generovaného záření (Vrbová, 1994).

Jedním z druhů rezonátorů je Fabry-Perotův. Ten má dvě rovnoběžná protilehlá zrcadla, která jsou kolmá k ose rezonátoru. Ke konstruktivní interferenci v tomto případě dochází, pokud délka rezonátoru je rovna celočíselnému násobku půlvlny záření. Pro jiné vlnové délky světlo rezonátorem neprojde a je odraženo nazpět (Vrbová, 1994).

Odrazivost (reflektance) zrcadla  $R_1$  je typicky menší než odrazivost zrcadla s odrazivostí  $R_2$ . Rezonátor je proto otočen tak, aby zrcadlo s menší odrazivostí  $R_1$  bylo na straně směřující do vnějšího rezonátoru směrem k difrakční mřížce. Záření procházející skrz zrcadlo s větší odrazivostí  $R_2$  je namířeno na detektor záření – fotodiodu. Tak je znázorněno na Obrázku 4.



Obrázek 4 – Rezonátor

Nastavení rezonátoru je prováděno kvůli zajištění nejmenších difrakčních ztrát v otevřeném rezonátoru. Nastavení rezonátoru laseru lze provést prostřednictvím pomocného laserového záření nebo kolimační čočky (Vrbová, 1994).

## 2.5 Laser

---

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, neboli *zesilování světla stimulovanou emisí záření* je název zařízení známějšího spíše pod akronymem LASER (Vrbová, 2006). Jeho unikátní vlastnosti poskytují širokou škálu možností, jak ho využít. Základními vlastnostmi jsou monochromaticnost (záření o jedné vlnové délce), koherence svazku (všechny vlny mají totožnou fázi), stejná polarizace jednotlivých fotonů a vysoká intenzita záření.

Po sestrojení a úspěšném spuštění prvního laseru se ukázalo, že je možné využít mnohých prostředí pro vyvolání laserování. Pokládá se za zvláštní, že se v běžné přírodě spontánní laserování nevyskytuje, ačkoliv ve vesmíru jsou známy kvantové generátory mikrovln, zvané masery (Strumban, 1989).

Pro generaci laserového záření je potřeba vyvolat stimulovanou emisi fotonů v takzvaném aktivním prostředí laseru. Pokud množství takto emitovaných fotonů převyšuje ztráty způsobené nedokonalou odrazivostí zrcadel rezonátoru, mluvíme o laserování (Engst, 1989). V případě polovodičových laserů proud, při kterém toto začíná probíhat, nazýváme prahový proud ( $I_{th}$ ). V angličtině je použit pro tuto hodnotu proudu pojem *threshold current*, z něhož je odvozena podoba této značky.

Velkou výhodou pro spektroskopické aplikace je, pokud je laser laditelný, tedy takový, který umožňuje změnu frekvence v širokých mezích. Frekvence generovaného záření lze pak změnit posuvem jedné energetické hladiny přechodu aktivním prostředí, například změnou jeho teploty nebo působením budícího proudu. Volbou aktivního prostředí a přidáním difrakční mřížky nebo hranolu lze také změnit vlnovou délku (Vrbová, 1994).

## 2.6 Diodové lasery

---

Tyto lasery, jak už název sám již vypovídá, fungují na principu polovodičové diody. Ta je složená z dvou na sobě ležících pevnolátkových vrstev. Dolní je vodivostního typu N, horní typu P. Mezi těmito vrstvami je aktivní oblast, kde vzniká laserové záření. Tento drobný předmět, také nazývaný laserový čip, má rozměry, které ho umožňují téměř bez problému prostrčit očkem jehly. Proto i z tohoto důvodu je umístěn do pouzdra, kde se nacházejí elektrické kontakty nezbytné pro jeho funkci.

Na přechodu mezi těmito vrstvami N a P vzniká zapojením do elektrického obvodu excitace elektronů. Jedná se o přechody mezi valenční a vodivostní vrstvou. Zde mezi vrstvami dochází k zesílení frekvence, pro které je splněn Bohrovův vztah:

$$h \cdot f = E_2 - E_1 \quad (3)$$

kde je  $h$  Planckova konstanta,  $f$  frekvence,  $E_2$  energie hladiny ležící ve vodivostním pásu a  $E_1$  energie hladiny ve valenčním pásu.

Laserový čip leží na katodě a kovové podložce pro odvod tepla. Shora je připojena anoda. Pro injekční lasery (tedy proudem buzené) je toto charakteristické sestavení. Jako nejvhodnější a nejčastější materiál tohoto typu je galenit arsenitý.

Vlivem vnějšího přívodu energie elektrickým proudem probíhá tzv. buzení. V aktivní oblasti se generuje stimulované záření, které přes zrcadlo s nižší reflektivitou září do vnějšího otevřeného rezonátoru a druhým směrem na detektor záření – fotodiodu (Vrbová, 1994). Pro spektroskopické aplikace je často samotný laserový čip umístován do vnějšího rezonátoru, který umožňuje kontrolovanou změnu jeho vlnové délky. V případě této práce je použito takzvané Littrowovo uspořádání.



## 2.7 Littrowovo uspořádání

---

Littrowovo uspořádání zahrnuje optické prvky pro rozklad na spektra, v našem případě difrakční mřížku, jež svazek světla prvního difrakčního řádu postupoval v dráze totožné s dopadajícím svazkem zpět do laseru a tím umožnil laserování na vybrané vlnové délce (Vrbová, 1998). Toto uspořádání je jedno z nejjednodušších, protože minimalizuje počet nutných optických prostředí k sestavení vnějšího rezonátoru na koliminační čočku a difrakční mřížku. Nastavení vlnové délky je provedeno rotací difrakční mřížky, která odliší vlnovou délku světla tak, že ji odrazí zpět do laseru. Pokud je difrakční mřížka, koliminační čočka a délka rezonátoru nastavena tak, aby jediný podélný mód tohoto vnějšího rezonátoru mohl být zpět odražen do zesilovacího čipu, laser bude vytvářet jedinou frekvenci laserového spektra.

Výběr koliminační čočky je důležitý protože má vliv na množství záření, které dopadne na povrch mřížky. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že úhel nultého řádu výstupního paprsku se mění podle toho, jak je vlnová délka nastavena.

Jedná se o optický prvek, jehož index lomu nebo profil povrchu se periodicky mění. Na jejím povrchu dochází k ohybu světla pro různé vlnové délky. Úhly odklonu závisí na geometrii uspořádání a period mřížky (Černoch, 2012). Podle toho, jestli záření prochází nebo se odráží od povrchu difrakční mřížky, rozlišujeme dva typy (propustný a odrazný) tohoto optického prvku. Propustná difrakční mřížka využívá propustné, například skleněné plochy, naopak odrazná kovové plochy. Lze také rozlišovat difrakční mřížku podle jejího ovlivňování amplitudy nebo fáze záření. V tomto případě je použita odrazná mřížka s vrypy, které jsou pilovitého průřezu (blejzovaného profilu), což umožňuje vysokou difrakční účinnost ve výsledném řádu odrazu (Vrbová, 1994). Nastavováním mřížky můžeme dosáhnout požadované nejvyšší účinnosti při Littrowově retrodifrakčním uspořádání, kdy nenastává zastínění části svazku profilem. Když koliminační výstup z laserového čipu dopadá na difrakční mřížku z úhlu  $\alpha$  s ohledem na povrch mřížky normálně a kolmo k mřížkovým linkám, difrakční paprsky opustí mřížku v úhlu  $\beta$  určeným mřížkovou rovnicí. Ta pro toto dopadající monochromatické záření udává maximum intenzity difraktovaného záření:

$$\Lambda (\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda \quad (4)$$

kde  $\Lambda$  je perioda mřížky (mřížková konstanta),  $\lambda$  vlnová délka dopadajícího záření,  $m$  je řád spektra ( $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ),  $\alpha$  je úhel dopadu,  $\beta$  je úhel difrakce  $m$ -tého řádu (Vrbová, 1994).

## 2.8 Použití diodových laserů ve spektroskopii

---

Spektroskopie je bezkontaktní metoda ke zkoumání struktury látky pomocí průchodu světelného paprsku skrz ni. Lasery jsou zde používány ke studiu atomových a molekulových spekter v ultrafialové, infračervené a viditelné oblasti.

V případě absorpční spektroskopie laserové záření procházející zkoumanou látkou dopadá na detekční zařízení, které zaznamenává změnu intenzity optického záření po jeho průchodu v závislosti na vlnové délce. Tímto se získá absorpční spektrum. Pokud je zjištěno slabé spektrum absorbující látky, lze zvýšit citlivost detekce použitím záření, které mnohonásobně projde látkou a tím pádem bude zajištěna vyšší citlivost detekce.

## 3 Praktická část práce

---

### 3.1 Měření proudových charakteristik

---

Zjištěním proudových charakteristik se získá základní diagnostika každé laserové diody. Tyto charakteristiky se jednoduše měří a jejich výsledky lze poté zpětně použít ke zjištění stavu laserové diody a případně odhalit její poškození.

Pro toto měření byla použita komerční dioda s označením RLT1480-10G. Pro všechny laserové diody, které jsou v této výzkumné laboratoři, se používá k usnadnění jejich identifikace jmen českých panovníků. Tyto jména jsou k jednotlivým laserovým diodám přiřazována podle období vlády, které se shoduje s jejich vlnovou délkou. Ze štítku, který je připevněn na pouzdře každé této laserové diody, je možné se dozvědět základní informace. Štítek použité diody, přezdívané Vladislav I. Jagellonský informuje, že pracuje na vlnové délce 1480 nm, její výkon je 10 mW, prahový proud je 33 mA, optimálně pracuje při buzení proudem menším než 60 mA a maximální proud, kterému může být vystavena je 80 mA. Schéma vedle jména zobrazuje zapojení elektrických vývodů laserové diody.



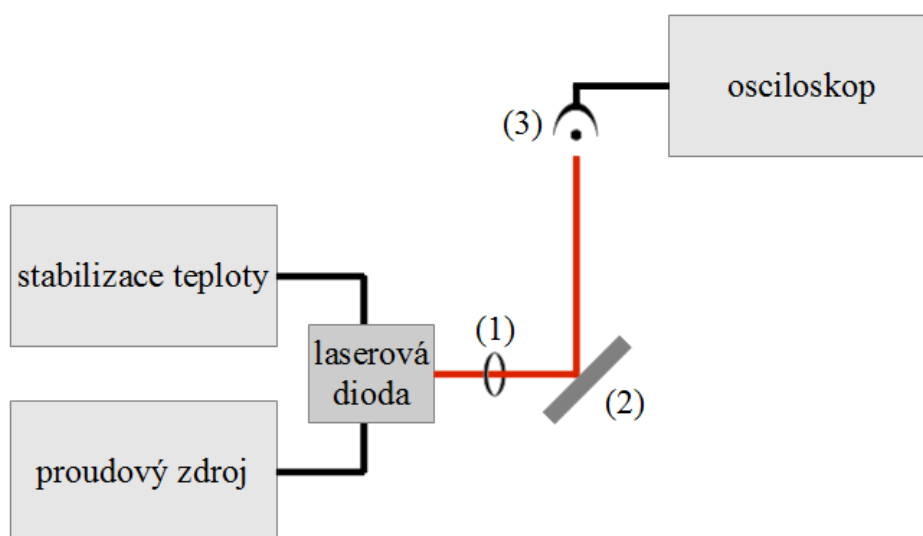
Obrázek 5 – Štítek laserové diody použité při měření proudových charakteristik

Před měřením byla pomocí speciálního nástroje vložena do držáku laserové diody koliminační čočka s malou ohniskovou vzdáleností. Samotná laserová dioda byla posléze zapojena podle schématu znázorněného na držáku. Podle štítku byl nastaven na proudovém ovladači maximální proud. Provádí se tak za použití plochého šroubováku. Ve zdířce přední desky laserového proudového ovladače se jeho otáčením změnil odpor rezistoru, a tím se udá maximální proud. Pokud by během následující manipulace byl nastavený proud překročen, laserový proudový ovladač zvukově ohlásí tuto skutečnost. Toto nastavení je nutné, aby se dioda nezničila příliš vysokým proudem.

Měření probíhalo během tří různých teplot ( $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$ ), aby tak byla zajištěna nejspolehlivější data pro co nejširší oblast provozu. Nastavení každé z těchto teplot teplotním ovladačem muselo proběhnout pozvolně. První nastavenou teplotou bylo  $10^{\circ}\text{C}$ . Tato hodnota se nachází na kraji možností teplotního ovladače, jenž je zkonstruován na minimální teplotu  $9,98^{\circ}\text{C}$ .

Na laserovém proudovém ovladači byla při každé zmíněné teplotě nastavena počáteční hodnota budícího proudu 5 mA. Ze stejného přístroje byl odečten proud pro laserovou diodu a referenční fotodiodu, která se nachází uvnitř pouzdra laseru. Budící proud se měnil po dvou nebo pěti miliampérech.

Generovaný svazek záření byl během měření kolimován čočkou (1) a odražen difrakční mřížkou (2) na vnější fotodiodu (3), která byla připojena k osciloskopu. Na obrazovce osciloskopu bylo možné sledovat probíhající změny budícího proudu a jeho amplitud.



Obrázek 6 – Schéma sestavení pro měření proudových charakteristik



Obrázek 7 - Laserové zařízení použité k měření proudových charakteristik

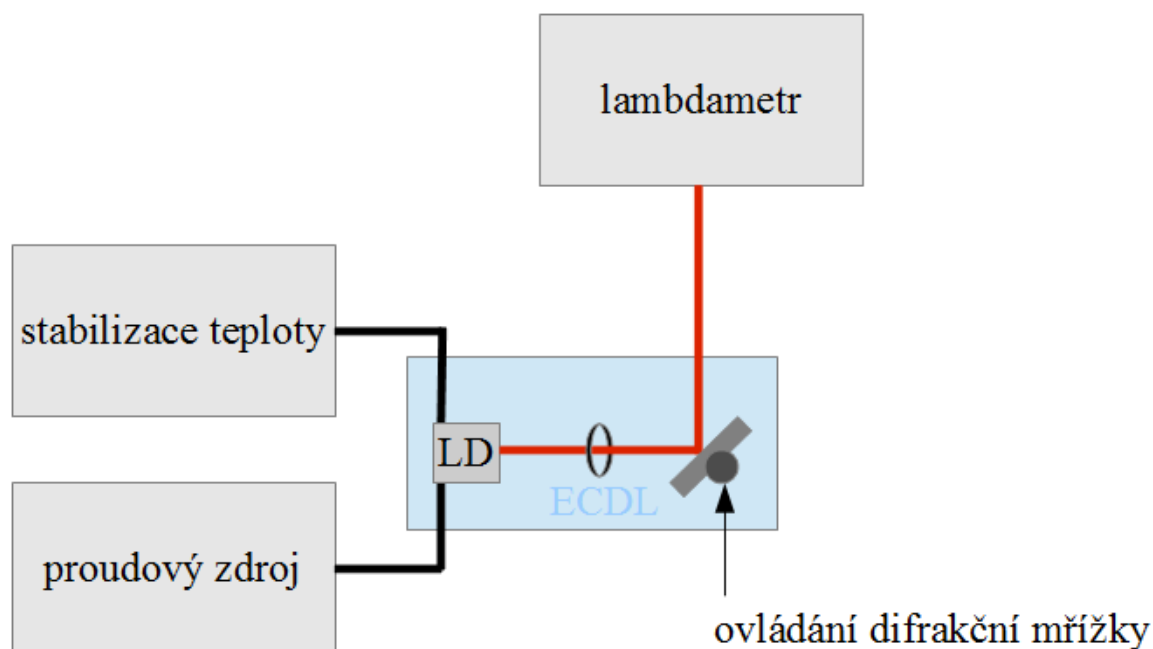
Zde je vidět sestavení laserového zařízení během měření. Na čelní straně je laserová dioda vložená do držáku s koliminační čočkou (1). Jak laserovou diodu zapojit podle jejich prvků, je znázorněno na schématu (2). Nezbytné konektory (3) pro proudový zdroj a stabilizaci teploty jsou zde také zabudovány. Samotný laserový čip se nachází za koliminační čočkou.

Stabilizace teploty byla zajištěna teplotním ovladačem TED 200 společnosti Thorlabs, Inc. Proudový zdroj byl proudovým ovladačem laserové diody LDC 205 500mA společnosti Thorlabs, Inc. Držák laserové diody byl použit TCDLM9 společnosti Thorlabs, Inc. Použitým osciloskopem byl Tektronix TDS 220. Vyhodnocení dat bylo provedeno v programu QtiPlot.

## 3.2 Měření přeladovacího rozsahu

Měření probíhalo s laserovou diodou určenou pro zkoumání molekuly amoniaku. Jelikož toto není komerční dioda, jedná se o zjišťování zcela nových dat. Rozsah přeladování této dané diody je klíčový parametr pro spektroskopická měření. Je potřeba vědět jeho šíři, aby bylo možné správně nastavit zařízení pro provedení experimentu a dostávalo se tak co nejpřesnějších výsledků.

Laserové zařízení bylo sestaveno dle Littrowova uspořádání (Obrázek 7). Označením ECDL se rozumí laserová dioda s vnějším rezonátorem (*external cavity diode laser*), které je běžně používáno pro tento typ sestavení.



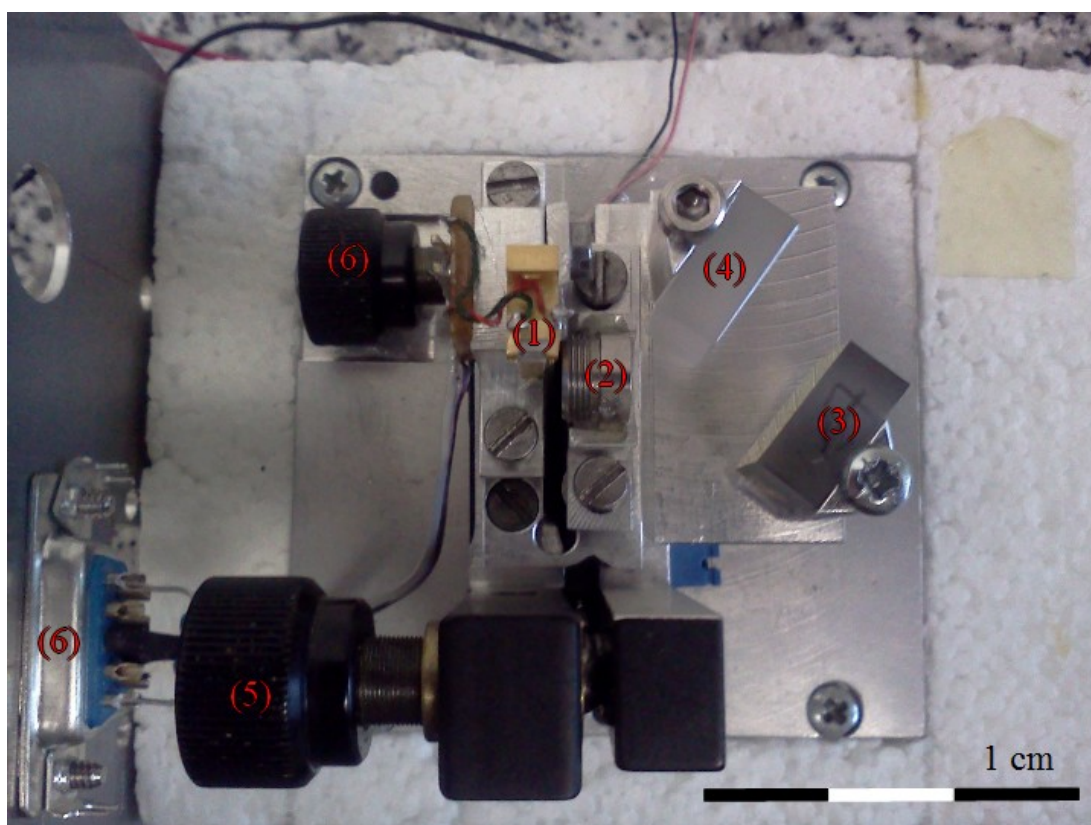
Obrázek 8 – Schéma sestavení pro měření přeladovacího rozsahu

Laserová dioda byla napájena proudovým ovladačem laserové diody LDC 205 500mA společnosti Thorlabs, Inc. a chlazena teplotním ovladačem TED 200 společnosti Thorlabs, Inc. Data byla čtena z vyhodnocovacího programu lambdametru (zařízení pro určení vlnové délky) v připojeném počítači.

Natáčením difrakční mřížky byla nastavena vlnová délka. Tento proces je nazýván justace. Nastavení vlnové délky bylo provedeno manuálně a za pomoci zobrazovací karty infračerveného záření, se kterou bylo možné zřetelně identifikovat všechny difrakční řády. Pro vybrání jediného řádu byla použita papírová karta se štěrbinou, která poskytovala dostatečný prostor pro práci s difrakční mřížkou. Nastavením difrakční mřížky k odražení

paprsku zpátky na laserový čip byl nalezen první řád. Světelný svazek byl nasměrován na detektor lambda metru – zařízení pro velmi přesné měření vlnové délky laserového zařízení. Následně bylo nutné provést justaci svazku ačkoliv již byl generován koherentní svazek. Bylo tak provedeno fokusačním šroubem s velmi jemnými závity. Ten pohyboval konstrukčním prvkem, na kterém byla připevněna laserová dioda. Při jedné otáčce šroubem bylo přiblíženo nebo oddáleno držákem laserové diody přibližně o 0,2 mm ( $200 \mu\text{m}$ ). Byla nalezena ideální vzdálenost, při níž svazek byl kolimován, tudíž nevytvářel za čočkou sekundární ohnisko a ani nebyl rozbíhavý. Po této konfiguraci bylo možné zahájit proměření proudových charakteristik.

Pro měření bylo vybráno šest různých vlnových délek, jejichž chování se zaznamenávalo během devíti hodnot budícího proudu. Úkolem bylo zjistit, při jaké hodnotě na dané vlnové délce začíná zařízení laserovat. Byl proto hledán prahový proud. Na základě zapsaných hodnot byly sestaveny a vyhodnoceny výsledky v programu QtiPlot.



Obrázek 9 - Littrowo uspořádání (pohled shora)

Na tomto obrázku lze vidět diodový laser v použitém Littrowově uspořádání během měření. Záření je generováno z diodového čipu, umístěného v držáku (1) a přes kolimizační čočku (2) dopadá na difrakční mřížku (3) a zrcátko (4), které ho vede dále do experimentu. Justace svazku záření je prováděno šrouby (5) a (6). Na zadní straně krytu zařízení se nachází konektor (6) pro proudový zdroj a stabilizaci teploty.

### 3.3 Výsledky

---

#### 3.3.1 Proudové charakteristiky

---

Proud byl nastaven v jednotce miliampéru. Napětí na laserové diodě a fotodiodě bylo měřeno v jednotce milivoltu. Pro teplotu 10°C byla data naměřena během osmnácti různých hodnot budícího proudu. Napětí intenzity na laserové diodě během této teploty se pohybovalo v rozmezí 2,86 – 6 410 mV. Napětí intenzity na fotodiodě bylo naproti tomu naměřeno malé, v hodnotách 0,10 – 78,70 mV.

Tabulka 1 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 10°C

proud (I/mA)	napětí na diodě (U/mV)	napětí na fotodiodě (U/mV)
5	2,86	0,10
10	5,28	0,20
15	8,64	0,30
20	13,60	0,50
25	26,60	0,70
30	112,00	1,70
32	389,00	5,50
34	870,00	11,20
36	1 260,00	15,80
38	1 720,00	21,20
40	2 200,00	27,00
42	2 610,00	31,80
44	3 020,00	36,90
46	3 470,00	42,30
48	3 880,00	47,30
50	4 330,00	52,90
55	5 410,00	66,30
60	6 410,00	78,70



Měření o pokojové teplotě 20°C probíhalo o stejných osmnácti různých hodnotách proudu jako u prvního. Napětí bylo na laserové diodě v hodnotách 2,3 – 4 220 mV a na fotodiodě v hodnotách 0,10 – 85,80 mV.

**Tabulka 2 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 20°C**

proud (I/mA)	napětí na diodě (U/mV)	napětí na fotodiodě (U/mV)
5	2,30	0,10
10	4,36	0,20
15	6,67	0,30
20	9,76	0,40
22	11,20	0,50
24	13,30	0,50
26	16,90	0,50
28	20,60	0,60
30	24,10	0,70
32	29,60	0,80
34	42,90	1,00
36	66,40	1,30
38	117,00	1,90
40	449,00	6,10
45	1 430,00	18,40
50	2 380,00	30,80
55	3 320,00	43,20
60	4 220,00	54,80

Pro teplotu 40°C bylo možné si dovolit zvolit více hodnot proudu. Měření bylo proto prováděno při jednadvaceti různých hodnotách proudu. Napětí na laserové diodě bylo naměřeno v hodnotách 2,48 – 2 000 mV a na fotodiodě v hodnotách 0,1 – 25,10 mV.

**Tabulka 3 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 40°C**

proud (I/mA)	napětí na diodě (U/mV)	napětí na fotodiodě (U/mV)
5	2,48	0,10
10	3,90	0,20
15	4,20	0,20
20	7,07	0,30
25	9,12	0,40
30	11,50	0,50
32	12,70	0,50
34	14,00	0,50
36	15,30	0,50
38	16,90	0,60
40	18,60	0,60
42	20,50	0,60
44	22,80	0,70
46	25,40	0,70
48	28,30	0,80
50	31,60	0,80
55	43,50	1,00
60	67,30	1,30
65	323,00	4,40
70	1 230,00	15,20
75	2 000,00	25,10

### 3.3.2 Přeladovací rozsah laseru

---

Tento parametr byl získáván pro šest vlnových délek (6 500 nm, 6 600 nm, 6 700 nm, 6 800 nm, 6 900 nm a 7 000 nm). Pro každou tuto vlnovou délku byla data měřena při devíti různých napětích intenzity v jednotkách milivoltu. Výsledkem byly hodnoty proudu v jednotkách miliampéru.

Pro první nastavenou vlnovou délku 6 500 nm byla získána data v rozmezí 116,3 – 171,5 mA:

**Tabulka 4 – Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 500 nm**

napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	116,3
200	134,3
300	139,7
400	145,1
500	150,4
600	155,7
700	161,0
800	166,4
900	171,5

Pro druhou vlnovou délku 6 600 nm byla získána data v rozmezí 51,3 – 56,7 mA:

**Tabulka 5 – Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 600 nm**

napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	51,3
200	51,8
300	52,4
400	53,1
500	53,8
600	54,5
700	55,3
800	56,0
900	56,7

Pro třetí vlnovou délku 6 700 nm byla získána data v rozmezí 48,7 – 55,2 mA:

**Tabulka 6 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 700 nm**

napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	49,7
200	50,4
300	51,1
400	51,7
500	52,4
600	53,1
700	53,8
800	54,5
900	55,2

Pro čtvrtou vlnovou délku 6 800 nm byla získána data v rozmezí 62,9 – 68,7 mA:

**Tabulka 7 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 800 nm**

napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	62,9
200	64,8
300	65,3
400	65,8
500	66,4
600	67,0
700	67,6
800	68,2
900	68,7

Pro pátou vlnovou délku 6 900 nm byla získána data v rozmezí 64,4 – 86,8 mA:

**Tabulka 8 – Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 900 nm**

napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	64,4
200	76,2
300	83,5
400	84,0
500	84,6
600	85,2
700	85,7
800	86,3
900	86,8

Pro poslední šestou vlnovou délku 7 000 nm byla získána data v rozmezí 65,5 – 127 mA:

**Tabulka 9 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 7 000 nm**

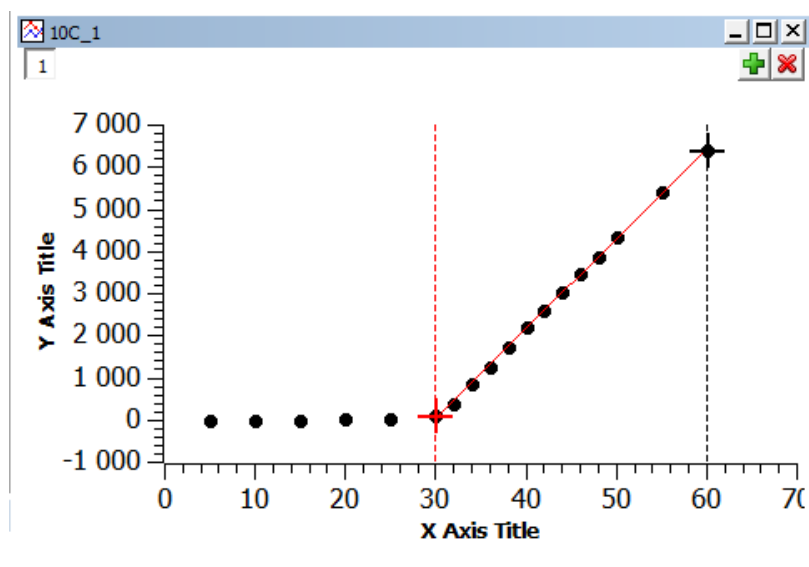
napětí (U/mV)	proud (I/mA)
100	65,5
200	77,8
300	87,9
400	96,0
500	103,1
600	110,1
700	115,5
800	121,3
900	127,0

## 3.4 Vyhodnocení výsledků

### 3.4.1 Proudové charakteristiky

Na základě zjištěných dat bylo umožněno v programu QtiPlot vypočítat prahový proud pro laser při daných třech teplotách. Data nejdříve musela být analyzována přes funkci *fit linear*. Jedná se o lineární regresi, která v tomto případě určuje vztah napětí na proud. Naměřené hodnoty jsou metodou nejmenších čtverců zprůměrovány na výslednou regresní křivku. Pro bližší ukázkou vyhodnocování bylo použito měření při 10°C.

Z dat v programu QtiPlot byl vytvořen bodový graf. Před analyzováním bylo nutné vybrat hodnoty  $x$  pro budící proud, u kterých bylo zřejmé, že při nich již dochází k laserování. Ty jsou na Obrázku 11 ohraničeny červeným a černým křížem. Po analyzování je již vidět červeně znázorněná regresní křivka.



Obrázek 10 - Lineární regrese pro 10°C

V záznamu výsledků programu (*results log*) na Obrázku 11 jsou hodnoty, se kterými bylo pracováno při vyhodnocování. V řádku (1) je označen rozsah vybraných hodnot  $x$  pro budící proud. Řádek (2) obsahuje hodnotu  $B$ . Ta je vzdáleností od počátku souřadnic průsečíku získané regresní přímky s osou  $y$ . Hodnota  $A$  v řádku (3) je sklon regresní přímky neboli tangensem úhlu, který regresní přímka svírá s osou  $x$ . Informaci o tom, jak dobře proložení (*fit*) proběhl, obsahuje řádek (4).

```

Results Log
[11/14/2012 3:35:02 PM      Plot: "10C_1"]
Linear Regression of dataset: 10C_2, using function: A*x+B
Weighting Method: No weighting
From x = 3,000000000000000e+01 to x = 6,000000000000000e+01 (1)
B (y-intercept) = -6,394502773375594e+03 +/- 5,863217391059776e+01 (2)
A (slope) = 2,140712361331220e+02 +/- 1,346068350850018e+00 (3)
-----
Chi^2/doF = 1,758936774240023e+03
R^2 = 0,999565268174355
Adjusted R^2 = 0,999478321809226
RMSE (Root Mean Squared Error) = 41,9396801876221 (4)
RSS (Residual Sum of Squares) = 19 348,3045166403
-----

```

Obrázek 11 – Záznam výsledků

Pro výpočet prahového proudu každé měření teploty byl použit vzorec (5),

$$I_{th} = - \frac{B}{A} \quad (5)$$

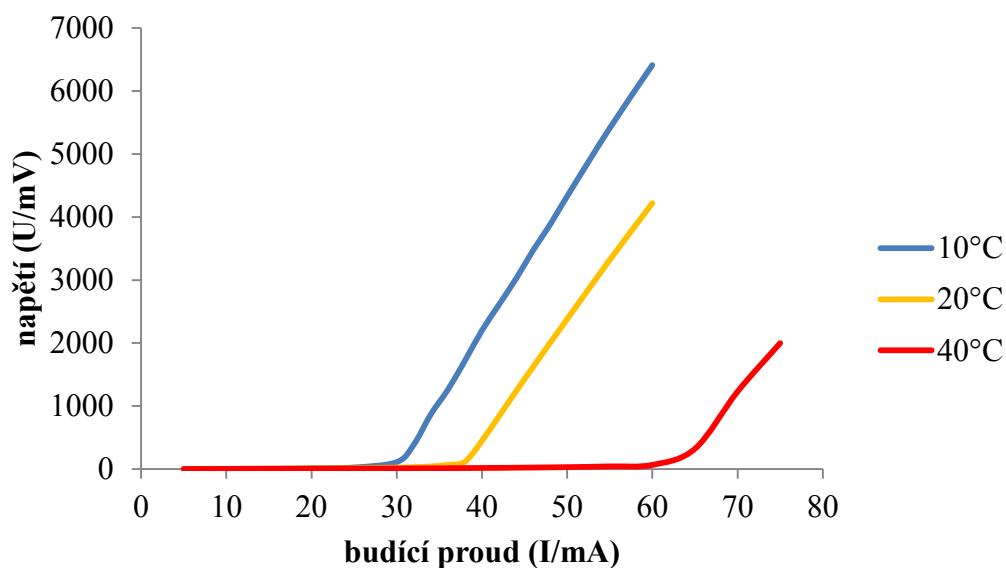
kde  $B$  je vzdálenost průsečíku získané regresní přímky s osou  $y$  od počátku souřadnic a  $A$  je sklon regresní přímky.

Bylo zjištěno zřejmé poškození této diody z důvodu neodpovídajícího naměřeného prahového proudu s oficiální hodnotou na jejím štítku. Výrobce udává hodnotu prahového proudu při běžné pokojové teplotě 33 mA, při měření byl zjištěn ale proud o hodnotě 37,3 mA. Výsledky lze vidět v Tabulce 10:

Tabulka 10 – Výsledky měření prahového proudu

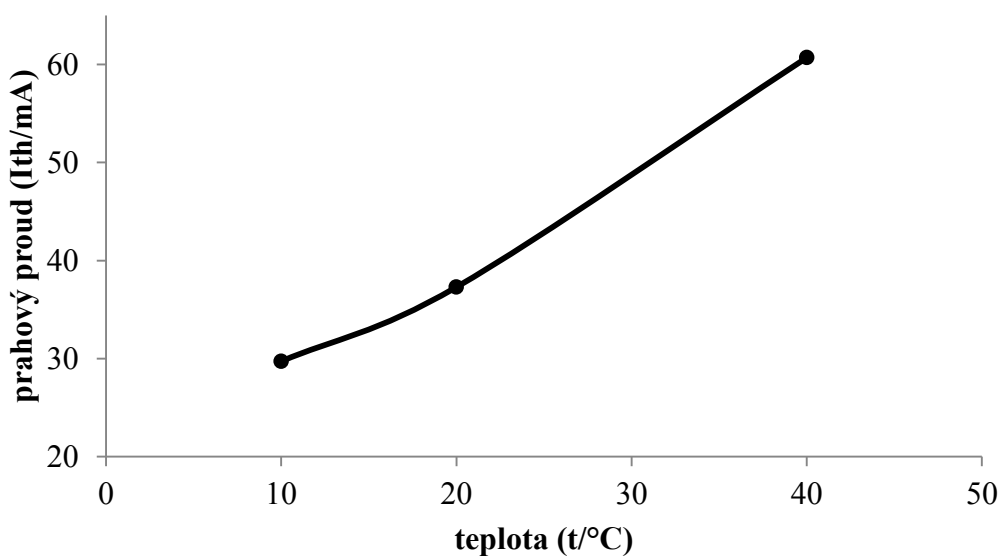
teplota (t/°C)	prahový proud (I <sub>th</sub> /mA)
10	29,73
20	37,30
40	60,70

Graf 1 zobrazuje dané tři teploty a jejich změny napětí v závislosti na budícím proudu. Jak je vidět, napětí (výkonu) se pohybuje těsně nad nulou do dosažení určité hodnoty, kde se křivka láme. V tomto zlomu bylo dosaženo prahového proudu a zařízení začalo generovat laserové záření. Následující prudký vzestup výkonu je nazýván diferenciální účinností. Zobrazené hodnoty zobrazují chování laserové diody. Graf fotodiody je stejný, liší se pouze hodnotami.



Graf 1 – Porovnání diferenciálních účinností

Na Grafu 2 lze pozorovat klíčový fakt, že se hodnota prahového proudu zvětšuje úměrně s teplotou. Z toho lze vyvodit, že laserová dioda začne dříve generovat laserové záření při nižší teplotě.



Graf 2 – Závislost teploty na prahovém proudu



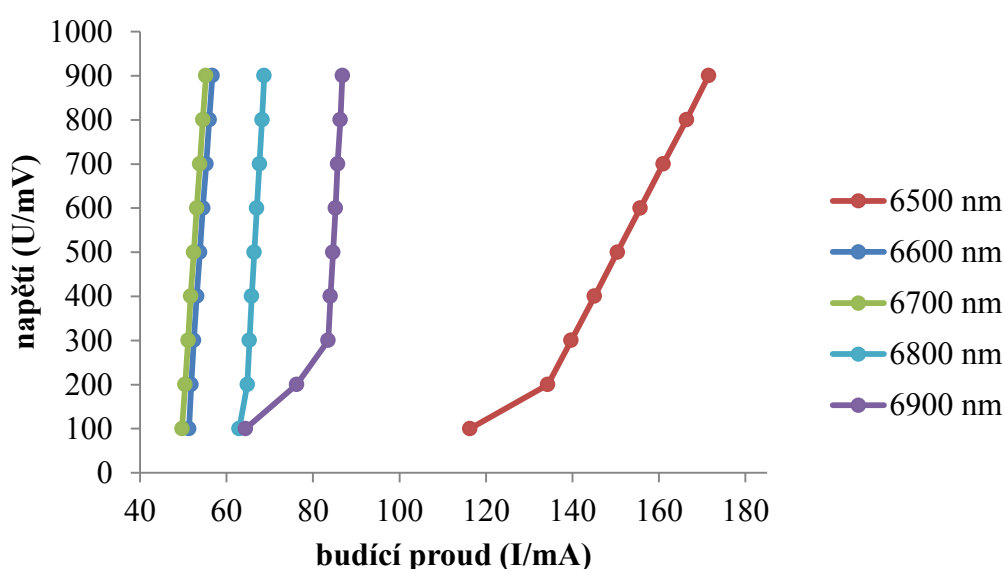
### 3.4.2 Přeladovací rozsah laseru

Data byla analyzována programem QtiPlot. Funkcí *fit linear* byly získány hodnoty A a B. V tomto případě nebylo nutné použít předešlý vzorec z důvodu kladné hodnoty B – vzdálenosti průsečíku regresní přímky na ose y od počátku souřadnic. Prahový proud byl tak určen touto hodnotou B. Zároveň bylo zjištěno, že se měření při vlnové délce 7 000 nm pohybovalo pod prahovým proudem. Z toho důvodu není tato oblast vyhodnocena. Zbylé výsledky lze vidět v Tabulce 11:

Tabulka 11 – Výsledky měření přeladovacího rozsahu

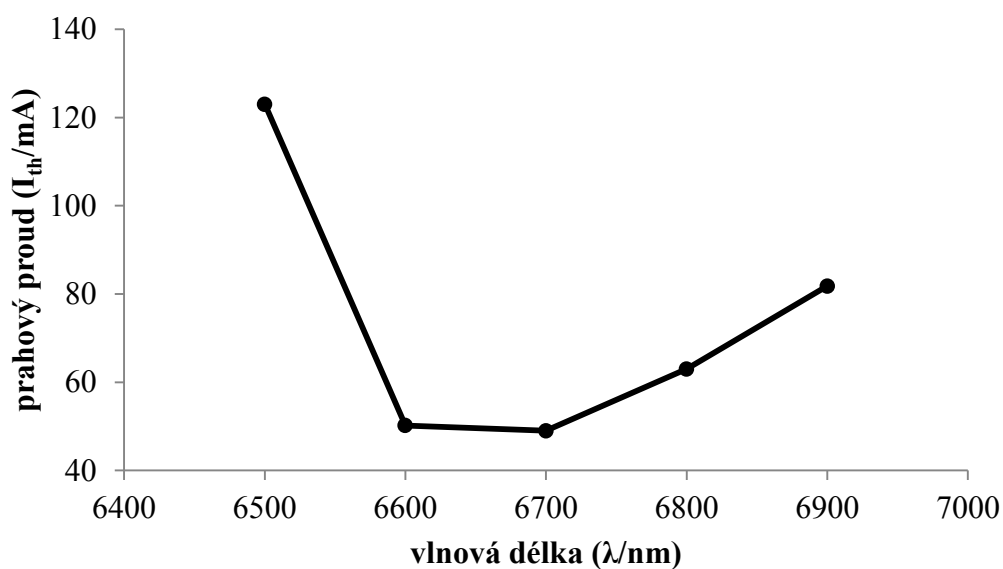
vlnová délka ( $\lambda$ /nm)	prahový proud ( $I_{th}$ /mA)
6 500	123,0
6 600	50,4
6 700	49,0
6 800	63,0
6 900	81,8

Na Grafu 3 je vidět, jaká je závislost intenzity na budícím proudu. Pro každou vlnovou délku se křivka mění. Ačkoliv se toto uspořádání zdá nesourodé, koresponduje s nadcházejícím Grafem 4.



Graf 3 – Závislost intenzity na budícím proudu

Zanesením hodnot do grafu byla získána křivka. Ta zobrazuje, jak se v závislosti na vlnové délce mění prahový proud laserové diody. Nejmenší prahový proud je uprostřed přeladovaného rozsahu diodového laseru. Z toho vyplývá, že práce s laserem na vlnových délkách 6 600 nm a 6 700 nm bude nejvhodnější, protože se dosáhne generování záření již při nižší intenzitě budícího proudu.



Graf 4 – Závislost prahového proudu na vlnové délce

## 4 Diskuse

---

Cílem práce bylo změřeni charakteristik dvou různých laserových diod. První byla použita bez vnějšího rezonátoru a byly proměřeny proudové charakteristiky při různých teplotách. Druhá laserová dioda byla použita ve vnějším rezonátoru v Littrowově uspořádání k charakterizování závislosti prahového proudu na vyzařované vlnové délce. Oboje měření byla úspěšně provedena a cíle práce byly tedy splněny. Pro konkrétní diodu použitou pro měření proudových charakteristik byl úspěšně ověřen předpoklad kontroly poškození. Zároveň bylo ověřeno, že hodnota prahového proudu se zvyšuje lineárně s teplotou, a že jak prahový proud, tak i diferenciální účinnost je odlišná pro každou vlnovou délku.

Laserová dioda, u níž byl měřen přeladovací rozsah, není komerční, a proto musí být její charakteristiky změřeny takto samostatně pro každý jednotlivý kus. Z tohoto důvodu nelze porovnat získaná data s jinými. Křivka Grafu 3 je ale stejná pro všechny laserové diody. Z výsledků ale vyplývá, že její vhodné pracovní proudy se budou pohybovat mezi 50 až 80 mA. Protože praxe ukazuje, že je žádoucí pracovat 15 mA nad prahovým proudem lze díky tomuto měření snadno budící proud nastavit na tuto hodnotu. Existuje však mnoho dalších parametrů a charakteristik, které bude důležité do budoucna popsat, protože jedině tak lze zjistit celkový objektivní pohled na tuto laserovou diodu a zajistit tak její optimální využití při spektroskopických měřeních.

## 5 Závěr

---

Charakteristiky byly měřeny pomocí dvou laserových polovodičových diod. Jejich cílem bylo poskytnout obraz o základních principech fungování laseru. Komerční laserová dioda pomohla určit obecná zjištění, která jsou však klíčová pro další práci s těmito zařízeními. Jedná se o popsání prahového proudu potřebného pro generování laserového záření a diferenciální účinnost při třech různých teplotách. Prahový proud se zvyšoval úměrně s danými teplotami. Ze získaných výsledků je vyvozeno, že neoptimálnější je pracovat s laserovým zařízením při nižších teplotách. Při nich není potřeba tak vysokého budícího proudu jako například u měřené teploty 40°C. Zde se rozdíl mezi těmito teplotami rovná téměř 30mA. Díky získaným výsledkům bylo možné zjistit i pravděpodobné poškození testované laserové diody. Výrobce udává prahový proud při běžné pokojové teplotě 33 mA, při měření bylo ale určeno, že se momentální prahový proud při těchto podmínkách nachází na 37,3 mA.

Měřením přeladovacího rozsahu laseru byla pro toto konkrétní zařízení zjištěna zcela nová data. Bylo ale možné je ověřit s výsledky u jiných laserových diod, protože jsou obecné pro každou z nich pouze s jinými hodnotami. Na základě těchto dat je určeno, že rozsah vlnových délek, na nichž lze s tímto laserem pracovat se pohybuje v rozmezí 6500 nm – 6900 nm. V praxi bude ale laserová dioda používána v oblasti mezi 6600 nm – 6700 nm, která je uprostřed zjištěného přeladovacího rozsahu. Na těchto vlnových délkách je prahový proud nejnižší. Z toho důvodu bude možné dříve generovat laserové záření než při jiných vlnových délkách, nebo jak je to v případě prvního měření, při vyšších teplotách.

## 6 Bibliografie

---

1. **Černoch, Antonín, Machulka, Radek a Soubusta, Jan.** *Optická spektroskopie*. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. str. 20. 978-80-244-3114-7.
2. **Engst, Pavel a Horák, Milan.** *Aplikace laserů*. 1. vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1989. str. 208.
3. **Hábovčík, Petr.** *Lasery a fotodetektory*. 1. vydání. Bratislava: Alfa, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, n.p., 1990. str. 318. 80-01-03561-1.
4. **Hamar, Martin.** *Když se hmota vlní a světlo zrní*. 1. vydání. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. str. 64. 978-80-244-3110-9.
5. **Jandora, Radek.** Vlnové vlastnosti světla. *Neoficiální internetová fakulta všeho možného*. [Online] Gymnázium Bučovice, 2000. <http://radek.jandora.sweb.cz/fl9.htm>.
6. **Kanický, Viktor.** Metody chemického výzkumu - laboratorní cvičení. *Cheminfo - server chemické sekce*. [Online] 17. 12. 2009. [http://cheminfo.chemi.muni.cz/chem\\_sekce/predmety/C7300/AES/Emisni%20spektralni%20analyza.pdf](http://cheminfo.chemi.muni.cz/chem_sekce/predmety/C7300/AES/Emisni%20spektralni%20analyza.pdf).
7. **Sochor, Václav.** *Lasery a koherentní svazky*. 1. vydání. Praha: Academia, 1990. str. 196. 80-200-354-1.
8. **Strumban, Jefimovič.** *Lasery a optoelektronika*. 1. vydání. Praha: Panorama, 1989. str. 248.
9. **Šiňor, Milan.** Historie Optiky. *Optika a moderní technologie*. [Online] ČVUT, 5. Červenec 1998. <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/optika/node4.html>.
10. **Von Laue, Max.** *Dějiny fyziky*. 1. vydání. Praha: Orbis, 1958. str. 198.
11. **Vrbová, Miroslava a kol.** *Lasery a moderní optika*. 1. vydání. Praha: Prometheus, 1994. str. 474. 80-85849-56-9.
12. **Vrbová, Miroslava a Šulc, Jan.** *Interakce rezonančního záření s látkou*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. str. 172. 80-01-0356-1.

## 7 Přehled obrázků

---

Obrázek 1 – Spektrum elektromagnetického záření s červeně označenou blízkou infračervenou oblastí .....	11
Obrázek 2 – Energetické pásy v polovodiči .....	12
Obrázek 3 – Energetické hladiny v plynu .....	13
Obrázek 4 – Rezonátor .....	14
Obrázek 5 – Štítek laserové diody použité při měření proudových charakteristik ...	17
Obrázek 6 – Schéma sestavení pro měření proudových charakteristik .....	18
Obrázek 7 - Laserové zařízení použité k měření proudových charakteristik .....	19
Obrázek 8 – Schéma sestavení pro měření přeladovacího rozsahu .....	22
Obrázek 9 - Littrowo uspořádání (pohled shora) .....	23
Obrázek 10 - Lineární regrese pro 10°C .....	30
Obrázek 11 – Záznam výsledků .....	31

## 8 Přehled tabulek

---

Tabulka 12 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 10°C .....	24
Tabulka 2 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 20°C .....	25
Tabulka 3 – Naměřené hodnoty proudových charakteristik při 40°C .....	26
Tabulka 4 – Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 500 nm .....	27
Tabulka 5 – Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 600 nm .....	27
Tabulka 6 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 700 nm .....	28
Tabulka 7 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 800 nm .....	28
Tabulka 8 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 6 900 nm .....	29
Tabulka 9 - Měření rozsahu laseru při vlnové délce 7 000 nm .....	29
Tabulka 13 – Výsledky měření prahového proudu .....	31
Tabulka 14 – Výsledky měření přeladovacího rozsahu .....	33

## 9 Přehled grafů

---

Graf 1 – Porovnání diferenciálních účinností.....	32
Graf 2 – Závislost teploty na prahovém proudu.....	32
Graf 3 – Závislost intenzity na budícím proudu.....	33
Graf 4 – Závislost prahového proudu na vlnové délce.....	34

## 10 Seznam použitých značek

---

značka	název	jednotka veličiny
$\lambda$	vlnová délka	$[\lambda] = \text{m}$
$c$	rychlost světla	$[c] = \text{m.s}^{-1}$
$f$	frekvence	$[f] = \text{Hz}$
$E$	energie	$[E] = \text{J}$
$h$	Planckova konstanta	$[h] = \text{J.s}$
$\Lambda$	mřížková konstanta	$[\Lambda] = \text{m}$
$R$	odrazivost	bezrozměrná
$I_{\text{th}}$	prahový proud	$[I_{\text{th}}] = \text{A}$
$U$	napětí	$[U] = \text{V}$