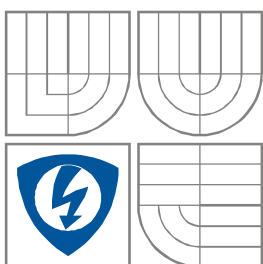


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION**
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PRACOVÍŠTĚ PRO TESTOVÁNÍ LASEROVÝCH DIOD

WORKPLACE FOR TESTING OF THE LASER DIODES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

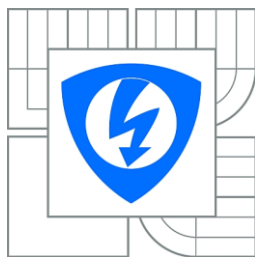
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN ZEMÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Martin Zemánek
Ročník: 3

ID: 140275
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Pracoviště pro testování laserových diod

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem funkce laserových diod a popište jejich základní charakteristiky a parametry. Navrhněte pracoviště pro testování standardních typů laserových diod a vytvořte program s grafickým výstupem umožňujícím stanovit vyzařovací charakteristiku, symetrii stopy svazku a výkon laserové diody.

Navržené pracoviště sestavte a experimentálně ověřte jeho možnosti a přesnost měření. Naměřené výsledky vybraných laserových diod porovnejte s jejich katalogovými údaji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995.

[2] CHOW, W.W., KOCH, S.W. Semiconductor – Laser Physics. New York: Springer, 1997.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na laserové diody, návrh pracoviště pro jejich testování a následné sestavení pracoviště s programem pro grafický výstup zpracovaných hodnot. Cílem testování jsou parametry laserových diod jako optický výkon, symetrie stopy svazku a vyzařovací charakteristika. Práce zahrnuje teorii k seznámení s laserovými diodami, seznam přístrojů potřebných pro pracoviště, jeho nákres, popsání metod měření a následné změření a vyhodnocení hodnot v programu s grafickým výstupem. Výsledné hodnoty jsou porovnány s katalogovými údaji.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laser, laserová dioda, vyzařovací charakteristika, optický výkon, svazek.

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on laser diodes and proposal in their workplace testing, followed by constructing workplace with program for graphical output with processed values of measurement. Laser diodes parameters as optical power, symmetry of the laser beam and radiation characteristic are the objective of this thesis. Thesis includes the theory of laser diodes, device list, workplace layout, description of measurement methods, followed by measuring and processing the values in program with graphical output. Resulting values are compared with catalog data.

KEYWORDS

Laser, laser diode, radiation characteristic, optical power, beam.

ZEMÁNEK, M. Pracoviště pro testování laserových diod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 30 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Otakar Wilfert, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Pracoviště pro testování laserových diod jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 30. května 2013

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. ing. Otakaru Wilfertovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 30. května 2013

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah.....	v
Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek.....	vii
Úvod	1
1 Energetické procesy v laserových diodách	2
1.1 Absorpce energie	2
1.2 Stimulovaná emise.....	3
2 Princip funkce laserových diod	4
3 Typy a struktura laserových diod.....	6
3.1 Homostruktura	6
3.2 Heterostruktura	9
3.3 Laserové diody s kvantovými jámami.....	11
3.4 Laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou	11
3.5 Plošně vyzařující laserové diody	12
3.6 Hranově vyzařující laserové diody	13
4 Parametry laserových diod.....	14
4.1 Spektrum.....	14
4.2 Optický výkon a budicí proud	14
4.3 Laserové světlo	16
5 Návrh pracoviště.....	17
5.1 Seznam potřebných přístrojů	17
5.2 Náčrtek a popis pracoviště	17
5.3 Metoda měření	18
6 Sestavení pracoviště	21
7 Zpracování naměřených hodnot ve vytvořeném programu	26
7.1 Naměřené hodnoty.....	26
7.2 Program s grafickým výstupem.....	27
Použitá literatura.....	33
Knihy a publikace.....	33
Internetová literatura	33
Závěr	34
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	35

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Energetický pás znázorňující absorpci fotonu elektronem.	2
Obrázek 2 Proces stimulované emise. (zdroj [6])	3
Obrázek 3 Optické čerpání polovodičového laserového zesilovače. (zdroj [2]).....	4
Obrázek 4 Optický výkon záření při daných vlnových délkách vyzářených laserovou diodou a LED. (zdroj [6]).....	5
Obrázek 5 Homostruktura laserové diody (zdroj [7])	7
Obrázek 6 Energetické hladiny oblastí typu P a N a koncentrace nosičů (zdroj [2])	7
Obrázek 7 Zahnuté energetické pásy a koncentrace nosičů náboje pro přechod P-N (zdroj [2])	8
Obrázek 8 Energetické pásy a koncentrace nosičů s přiloženým napětím v přímém směru (zdroj [2])	9
Obrázek 9 Energetické pásové schéma heteropřechodu P-P-N (zdroj [2]).....	10
Obrázek 10 Jednoduchá heterostruktura (zdroj [7]).....	10
Obrázek 11 Dvojitá heterostruktura (zdroj [7]).....	11
Obrázek 12 Struktura laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou (zdroj [7])	12
Obrázek 13 Plošně vyzářující laserová dioda [vlastní zdroj]	13
Obrázek 14 Hranově vyzářující laserová dioda [vlastní zdroj]	13
Obrázek 15 Závislost výstupního výkonu na budícím proudu (zdroj [9])	15
Obrázek 16 Závislost budícího proudu na teplotě laserové diody (zdroj[9]).....	15
Obrázek 17 Pracoviště pro testování laserových diod [vlastní zdroj]	17
Obrázek 18 Eliptická symetrie stopy svazku	18
Obrázek 19 Profil svazku laserového světla	19
Obrázek 20 Eliptická symetrie stopy svazku	20
Obrázek 21 Pracoviště pro testování laserových diod	21
Obrázek 22 Držák s úchytnou destičkou pro laserovou diodu	22
Obrázek 23 Optický detektor	23
Obrázek 24 Laboratorní zdroj Diametral	24
Obrázek 25 Generátor tvarovaných vln Agilent	24
Obrázek 26 Osciloskop Tektronix.....	25
Obrázek 27 Vyzářovací charakteristika laserové diody	30
Obrázek 28 Symetrie stopy svazku	31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Naměřené hodnoty - horizontální osa.....	26
Tabulka 2 Naměřené hodnoty - vertikální osa.....	27

ÚVOD

Bakalářskou práci na téma „Pracoviště pro testování laserových diod“ jsem si vybral ze zájmu o optoelektroniku jako celek, jejíž důležitou součástí jsou zdroje optického záření, v tomto případě polovodičové injekční lasery.

Název laser je anglická zkratka – light amplification by the stimulate emission of radiation – tedy zesilování světla stimulovanou emisí záření. Pojem laser používal Albert Einstein již od roku 1917. Práce na jeho vývoji začala o několik desetiletí dříve, než byl vůbec první laser na začátku šedesátých let sestaven. Laserové světlo má mnoho vlastností, které u jiných zdrojů světla nenajdeme. Jednou z nich je vysoká monochromaticnost v porovnání s ostatními zdroji světelného záření. Vykazuje také vysokou koherenci. Vlny laserového světla mohou být dlouhé i několik stovek kilometrů, tedy pokud se dva svazky laserového světla šířily po různých trajektoriích takové délky, mohou spolu i poté interferovat a vytvářet interferenční proužky. V neposlední řadě je laserové světlo vysoce směrové a má tedy velice malou rozbíhavost, což lze jednoduše vyvodit z možnosti měření vzdálenosti Země-Měsíc laserovými pulzy, které na povrchu Měsíce vytváří jednu miliontinu průměru Měsíce. Ke generaci laserového světla je zapotřebí procesů, které budou následně uvedeny v jednotlivých kapitolách, již přímo spojených k laserovým diodám.

Pro návrh a sestavení pracoviště pro testování laserových diod je nutné se seznámit s principy funkce laserových diod, základními charakteristikami a jejich parametry. Jako základ poslouží znalosti z oblasti obecné fyziky a to konkrétně elektromagnetismu a optiky, které umožní pochopit zkoumanou problematiku. Cílem pracoviště totiž bude i zajištění grafického znázornění vyzařovací charakteristiky, symetrie stopy svazku a výkon laserové diody. V této bakalářské práci se hodlám věnovat jednotlivým teoretickým poznatkům z fyziky a elektroniky potřebným k popsání laserových diod i jejich parametrům.

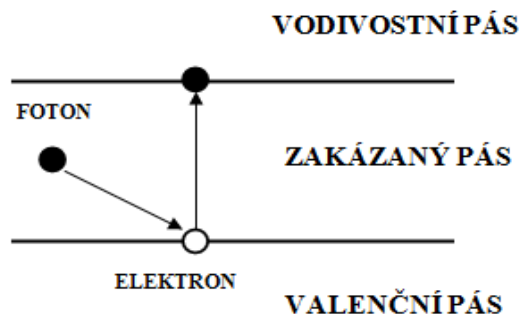
1 ENERGETICKÉ PROCESY V LASEROVÝCH DIODÁCH

Pro popis principu funkce laserových diod je nezbytné znát určité pochody, které vysvětluje kvantová fyzika. Jedním z nich je generace světla (emise fotonů), v tomto případě laserového. Stejně jako pro ostatní procesy platí i pro generaci laserového světla zákony zachování energie. Pokud tedy budeme chtít vygenerovat energii ve formě laserového světla, budeme muset nějakou energii dodat, ať už ve formě elektrické energie nebo energie v podobě optického záření, která nashromáždí další generaci optického záření. K emisi fotonů dochází při přechodu z energetických stavů v kvantové soustavě a to konkrétně pro přechod z vyššího energetického stavu do nižšího. V krystalických pevných látkách a polovodičových laserech jsou tyto energetické stavy reprezentovány jako energetické hladiny vytvářející energetické pásy, které se používají pro popis energetických skoků elektronů. [2]

1.1 Absorpce energie

Pokud chceme určitý druh energie získat, musíme i nějakou energii dodat. To plyne ze zákona zachování energie, který už jsem zmiňoval výše. energii můžeme dodávat i získat v různých formách. Umíme přeměnit energii elektrickou na tepelnou - například elektrické topení, či žárovky. Mechanickou na elektrickou, což je princip alternátoru. Nás bude nejvíce zajímat přeměna elektrické energie na energii světelnou, která je zapotřebí k funkci injekčních polovodičových laserů.

K přeměně forem energie je ovšem nutné, aby daný systém energii absorboval (pohltil) a následně tuto energii využil. Systém může energii absorbovat ve formě elektrické a dodat do námi požadované formy – světelné. Na následujícím obrázku 1.1 je znázorněn základní princip absorpce, zde vyobrazený dodáním energie elektronu letícím fotonem.

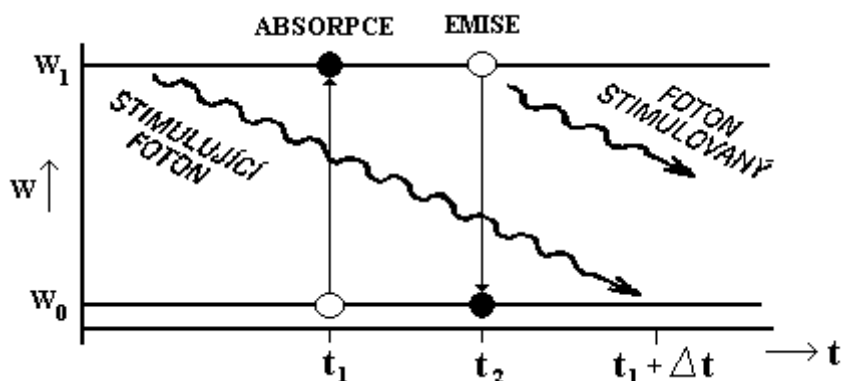


Obrázek 1 Energetický pás znázorňující absorpci fotonu elektronem.

Obecně totiž platí, že foton musí mít energii rovnou rozdílu mezi energetickou hladinou, na níž se elektron dostane, a energetickou hladinou, v níž se elektron právě nachází. Zde je tedy k absorpci fotonu elektronem a jeho následném přeskoku z valenčního pásu do pásu vodivostního nutné, aby měl foton energii odpovídající energii zakázaného pásu. Těchto přeskoků se účastní pouze valenční elektrony. Pokud se účastní přeskoků elektrony hlubších hladin, nenacházíme se už kolem energií několika elektronvoltů, nýbrž megaelektronvoltů a jedná se o Rentgenovo záření, což v případě měřených laserových diod nebude možné. Energie uvolňovaná za přeskoků valenčních elektronů v struktuře diod vyzařujících viditelné světelné záření se pohybuje v rozmezí několika elektronvoltů. Má na to vliv velikost zakázaného pásu, která určuje vlnovou délku, tedy barvu světelného záření, které je následně emitováno.

1.2 Stimulovaná emise

Laserové světlo a světlo LED (Light-emitting diode) se liší právě v typu generace světla. V LED je světlo generováno spontánní emisí, zatímco v laserových diodách a laserech obecně je generováno emisí stimulovanou. Je to proces, při kterém se na emisi fotonu podílejí i vnější jevy. Musí dojít tedy ke stimulaci energetického systému. V našem případě je to injekce elektronů a děr v P-N přechodu. Příklad stimulované emise je zobrazen na obrázku 2.

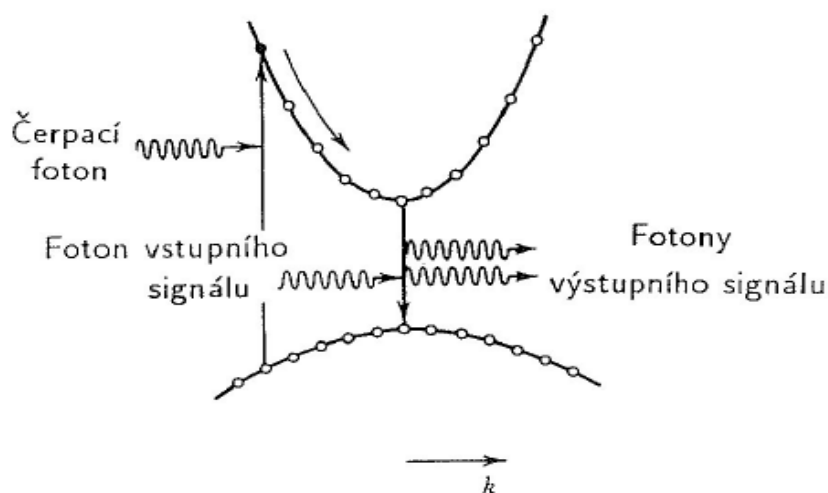


Obrázek 2 Proces stimulované emise. (zdroj [6])

Stimulující foton prochází kvantovou soustavou energetických hladin, když v čase t_1 je elektron vybuzen do vyšší energetické hladiny. Prolétající foton v čase t_2 vybuzený elektron přesune zpět do základního stavu dřív, než dojde k spontánní emisí, a vyzáří přitom stimulovaný foton se stejnými vlastnostmi jako foton stimulující. Stimulovaný foton disponuje stejnou energií, polarizací vlnění, fází a stejným směrem. Dochází tedy ke stimulované emisí. Na rozdíl od příkladu s absorpcí energie, kdy dopadající foton byl pohlcen elektronem ve valenčním pásu, stimulující foton kvantovou soustavou prochází dál společně s fotonem stimulovaným a jsou vzájemně koherentní. [2][6]

2 PRINCIP FUNKCE LASEROVÝCH DIOD

Pro generaci laserového světla je zapotřebí stimulované emise převládající nad absorpcí, viz kapitola o stimulované emisi. Rozdílem mezi ostatními lasery a polovodičovými lasery jsou jejich zářivé přechody. Například v plynovém laseru se tyto přechody uskutečňují mezi diskrétními energetickými hladinami, ovšem v polovodičových injekčních laserech mezi energetickými pásy, protože jejich polovodičové krystaly mají aktivní atomy hustě vedle sebe. Ke stimulované emisi by v polovodiči nedošlo, pokud by nedosáhla látka inverzní populace. Pokud v látce dojde k inverzní populaci znamená to, že je látka v nerovnovázném stavu. Počet kvantových soustav v základním stavu N_0 , které mohou popřípadě absorbovat energii letícího fotonu figurujícího v příkladě stimulované emise (kapitola 1.2), převládají nad počtem kvantových soustav N_1 ve vybuzeném stavu, pokud se jedná o látku s termodynamickou rovnováhou. Nerovnovázný stav $N_0 < N_1$ je pro fungování laseru žádoucí. Je to základní podmínkou, která umožňuje sestavit laser. K dosažení nerovnovázného stavu, tedy inverzní populace v látce s termodynamickou rovnováhou, je nutné přivést vhodné množství energie. Může to být optickým buzením využívaným zejména v rubínových laserech, kde je dodání energie realizované laserovým zábleskem. Příklad optického buzení je vidět na obrázku 3.

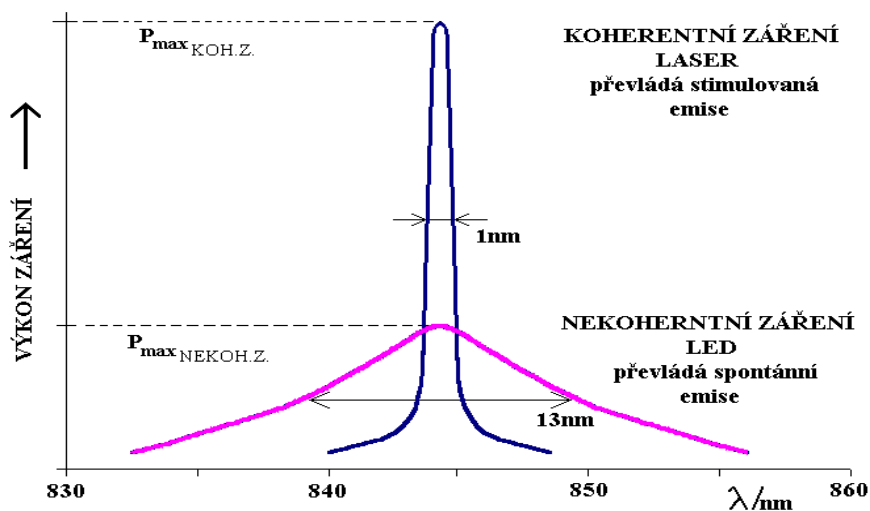


Obrázek 3 Optické čerpání polovodičového laserového zesilovače. (zdroj [2])

Praktičtější způsobem je čerpání elektrického proudu čili injekce elektronů a děr v silně dotovaném polovodiči P-N. Druhý způsob využívají ke své funkci právě polovodičové injekční lasery, tedy laserové diody čerpané elektrickým proudem. Přivede-li se na přechod P-N nebo heteropřechod polovodičového injekčního laseru elektrický proud, injektují se do něj elektrony a díry. Touto injekcí elektronů a děr vzniká v polovodiči aktivní prostředí. Stejně jako ve všech ostatních generátorech, dochází ke generování optického záření v polovodičovém injekčním laseru, zavede-li se v něm kladná zpětná vazba přivádějící část

zesíleného výstupního signálu na vstup. Jako zpětná vazba se v polovodičových injekčních laserech používají různé druhy optických rezonátorů, rozložené zpětné vazby nebo selektivní odražeče.

Velikost elektrického proudu tekoucího v přímém směru přes heteropřechod nebo P-N přechod laserové diody udává i emitovaný optický výkon a druh generace optického záření. Při nízkém budícím proudu dochází ke spontánní emisi šířící se všemi směry s náhodnou fází. Při zvyšování budícího proudu se zvyšuje rychlost zářivé rekombinace vyvolávající větší hustotu fotonového toku. Stejně tak generované fotony mohou stimulovat další elektron-děrové rekombinace. Při určitém prahovém proudu, který má každá laserová dioda odlišný, dojde ke stimulované emisi. Práh budícího proudu má úzkou oblast čerpání elektrické energie a nastává při přechodu spontánní emise na emisi stimulovanou. Stimulovaná emise převažující nad absorpcí a ostatními ztrátami v optickém rezonátoru způsobí vznik oscilací, které mohou vyvolat zvýšený nárůst toku fotonů v optickém rezonátoru. Tento vnitřní tok fotonů má společně s vyzařovací účinností danou poměrem mezi ztrátami způsobenými průchodem žádaného optického záření zrcadly a mezi celkovými ztrátami v optickém rezonátoru, vliv na výstupní tok fotonů injekčního polovodičového laseru. Pokud dojde ke zvýšení intenzity vyzařování nelineárně vůči budícímu proudu laserové diody, dojde k procesu zvanému superluminiscence. Stejně jako fotony generované při spontánní emisi mají fotony generované při procesu superluminiscence různé směry šíření s náhodnou fází. Rozdíl vyzařovaného optického výkonu v závislosti na spektru laserové diody a LED na obrázku 4.



Obrázek 4 Optický výkon záření při daných vlnových délkách vyzářených laserovou diodou a LED. (zdroj [6])

U injekčních polovodičových laserů se nemusí využívat speciálních zrcadel, abychom dosáhli odrazení elektromagnetické vlny. Index lomu vzduch-polovodičový krystal má relativně vysokou hodnotu, tedy stačí využít pouze odraz elektromagnetické vlny od daného rozhraní. Realizace takového optického rezonátoru je pak podmíněna vzájemnou rovnoběžností dvou protilehlých stěn polovodičového injekčního laseru a jejich kolmost k rovině přechodu P-N. Rezonátor ovšem přispívá k celkovým ztrátám celého systému. Uplatní se absorpce a rozptýlení laserového záření v prostředí způsobující prostorově

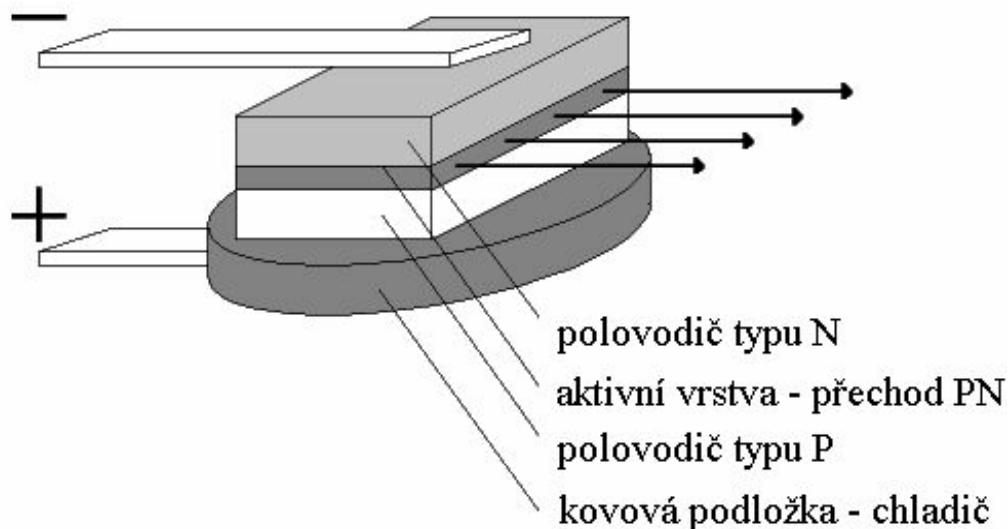
rozložené ztráty. Optickým rezonátorem se taktéž dosahuje koherence. Optický rezonátor zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny na určitém kmitočtu a stanovenou fází, což vyvolá stojaté vlnění. Kvalita rezonátoru určuje i stupeň koherence vyzářeného laserového světla. [2][3][6]

3 TYPY A STRUKTURA LASEROVÝCH DIOD

Laserové diody se dělí podle druhu struktury a také typem, kterým mohou laserové světlo vyzařovat. Struktury diod mohou být děleny podle jejich přechodu, kde se uskutečňuje elektrické čerpání a generace laserového záření stimulovanou emisí. Laserová dioda může být tvořena dvěma vrstvami přechodu P a N stejného materiálu - homopřechod - stejně jako u klasických diod nebo může být tvořena strukturou s více vrstvami různých přechodů a polovodičového materiálu, které jsou nazývány heteropřechody. Dále je dělíme na laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou a s kvantovými jámami. Podle toho jak laserové diody vyzařují laserové světlo, mohou být buďto hranově vyzařující laserové diody nebo plošně vyzařující. Jednotlivé typy a struktury laserových diod mají různé parametry, takže pro různé typy je i rozdílné využití. Některé mají účinnost vyšší, jiné zase nižší, což se odvíjí od ztrát způsobených konstrukcí nebo odlišnou strukturou. [3][7]

3.1 Homostruktura

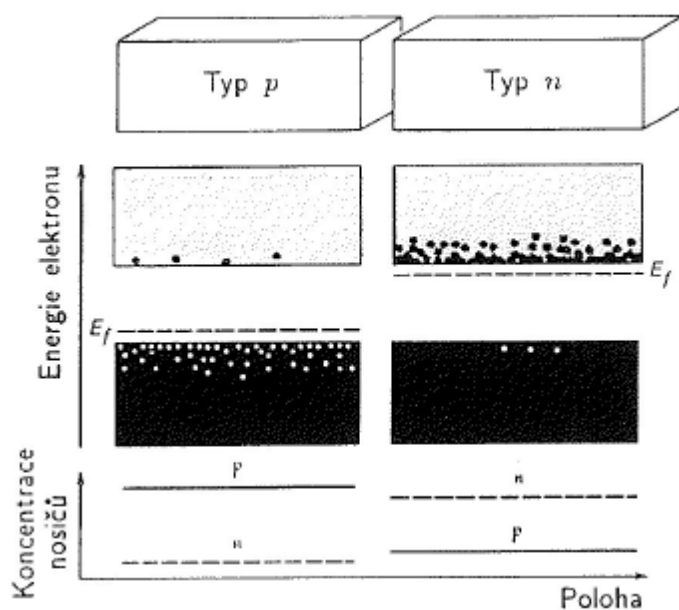
V homostruktuře se nenachází velká skoková změna indexu lomu, jež by zajistila optické soustředění. Stejně tak v homostruktuře není vysoká potenciálová bariéra způsobující soustředění nosičů náboje. Aktivní vrstva je rekombinační oblast určená difúzní délkou menšinových nosičů. Například pro silně dopovaný přechod vyrobený z arsenidu gallia je délka 1-3 mm. K soustředění optického záření zde dochází vlivem gradientu indexu lomu a rozdílu koncentrace nosičů náboje. Pro velké šířky aktivní oblasti jsou potřebné velké prahové hustoty proudu. Při generaci optického záření vznikají ztráty vlivem úniku záření do okolních vrstev polovodičového materiálu, což má za následek nižší účinnost. Provoz laserové diody s tímto typem přechodu potřebuje dobré chlazení, z čehož pramení i malá využitelnost tohoto typu v praxi.



Obrázek 5 Homostruktura laserové diody (zdroj [7])

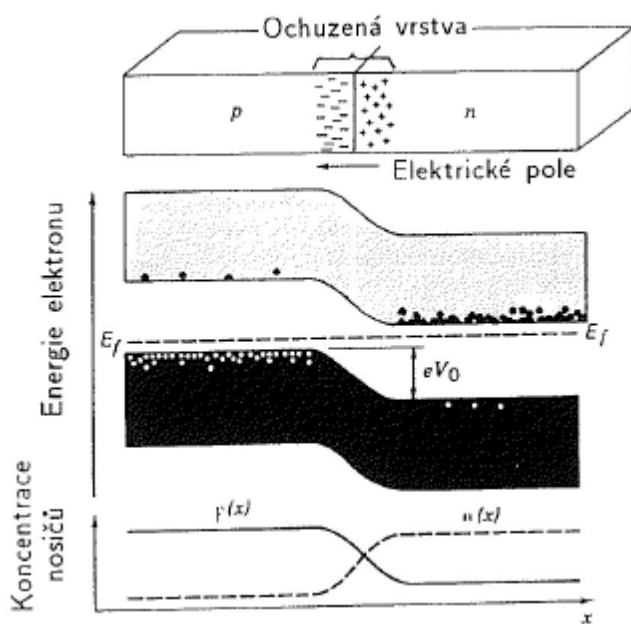
Homopřechody jsou tvořeny různě dotovanými oblastmi, ale tyto oblasti jsou vyrobeny ze stejného materiálu. Například přechod P-N, tvořený Arsenidem gallia, je typický polovodičový přechod různých druhů diod, který byl použit v sestavení první laserové diody schopné plně emitovat koherentní záření laserového světla.

Majoritním nosičem v polovodiči typu P jsou díry. Pohyblivých děr v oblasti typu P je tedy dostatek a naopak pohyblivých elektronů se v této oblasti mnoho nevyskytuje. Elektrony jsou v této oblasti minoritními nosiči náboje. Polovodič typu N je přesným opakem polovodičové oblasti typu P – majoritní nosiče náboje jsou zde elektrony a minoritní nosiče zase díry. Nosiče náboje obou typů se vyznačují chaotickým tepelným pohybem.



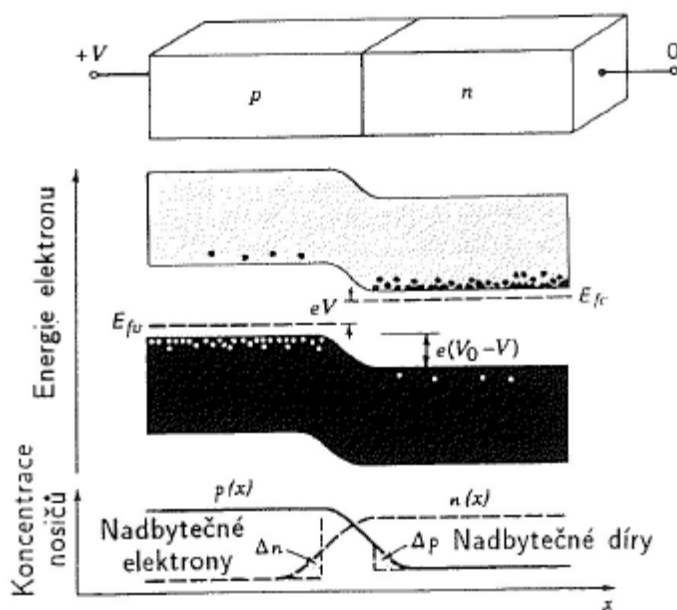
Obrázek 6 Energetické hladiny oblastí typu P a N a koncentrace nosičů (zdroj [2])

Spojíme-li obě oblasti (typ P a typ N), vznikne nám právě homopřechod P-N. Vznikem přechodu P-N dojde k difuzi elektronů a děr z oblastí o vysoké koncentraci do oblastí o koncentraci nízké. V oblasti typu N vznikají kladně nabitě a nepohyblivé donory, protože elektrony difundují z této oblasti do oblasti P, kde následně rekombinují s dírami. Díry naopak difundují z oblasti typu P do oblasti typu N a zanechají po sobě záporně nabitě nepohyblivé akceptory. Stejně jako v případě difuze elektronů, dochází po difuzi děr do oblasti N k rekombinaci s elektrony. V obou oblastech dojde k porušení nábojové rovnováhy, takže k difuzi elektronů a děr do jiných oblastí nemůže docházet pořád. Na obou stranách přechodu vznikne úzká ochuzená oblast obsahující pouze nepohyblivé náboje, tedy donory v oblasti N a akceptory v oblasti P. Koncentrace dotující směsi ovlivňuje tloušťku ochuzené vrstvy v oblastech P i N. Akceptory a donory vytváří v ochuzené vrstvě elektrické pole. Směr elektrického pole je z oblasti typu N do oblasti typu P. Elektrické pole zabraňuje difuzi dalších pohyblivých nosičů elektrického náboje přes přechod. Rovnovážné podmínky mají za následek potenciálový rozdíl V_0 mezi dvěma stranami ochuzené oblasti. Strana oblasti typu N má vyšší potenciál než strana P. V_0 je vnitřní potenciál neboli difuzní potenciál má vliv na zahnutí energetických pásů, které je možno vidět na Obrázek 7. Díky difuznímu potenciálu mají elektrony na straně N nižší potenciál a na straně P vyšší potenciál. Fermiho hladiny se v oblastech P a v oblastech N musí rovnat. Vyplývá to z Fermiho funkce pro strukturu, která je při tepelné rovnováze jenom jedna. Přechodem P-N neteče žádný proud. Dojde ke kompenzaci difuzních a driftových proudů pro díry i elektrony.



Obrázek 7 Zahnuté energetické pásy a koncentrace nosičů náboje pro přechod P-N (zdroj [2])

Napájecím napětím se dá měnit potenciálový rozdíl mezi oblastmi typu P a N. Se změnou potenciálového rozdílu se docílí ovlivnění toku majoritních nosičů, takže se přechod dá použít jako hradlo. Přiložením kladného napětí k oblasti P vznikne v oblasti N nárůst potenciálového rozdílu a vytvoří se elektrické pole.



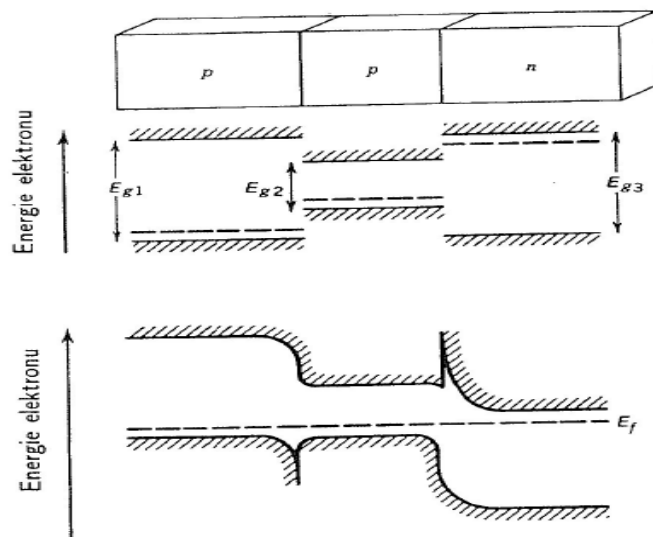
Obrázek 8 Energetické pásy a koncentrace nosičů s přiloženým napětím v přímém směru (zdroj [2])

Vytvořením elektrického pole se vyruší vnitřní pole přechodu. Vyrovnání Fermiho hladin v oblastech P a N se poruší vlivem vnějšího elektrického pole způsobující odchylku od rovnovážného stavu. Zapojení napětí na přechodu v přímém směru snižuje potenciálový rozdíl o hodnotu eV , viz obrázek 8. Proud majoritních nosičů se následkem přiloženého napětí v přímém směru zvýší. Nadbytečné majoritní díry se přesouvají do oblastí typu N a nadbytečné majoritní elektrony zase do oblasti typu P. Přesunuté nadbytečné majoritní díry i elektrony se pak stávají minoritními a rekombinují s majoritními nosiči dané oblasti, do které se přemístily. Proces, při kterém se majoritní nosiče stávají minoritními, nazýváme injekce minoritních nosičů. Čím více jsou vzdáleny majoritní nosiče od přechodu, tím více klesá jejich koncentrace. Bude-li P-N přechod zapojen ve zpětném směru, tedy záporné napětí přiložené na oblast P a kladné na oblast N, omezí se tok majoritních nosičů a zvedne se výška potenciálového schodku o hodnotu eV . [2][3][6]

3.2 Heterostruktura

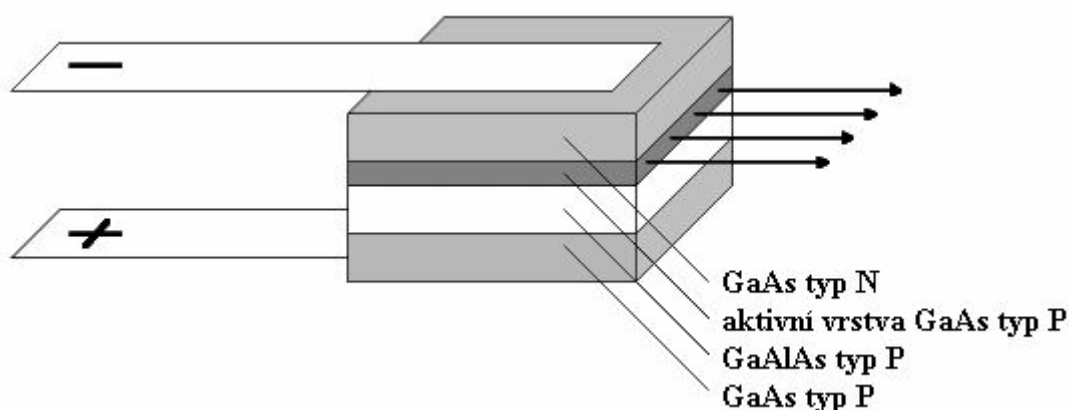
Na rozdíl od homopřechodu není heteropřechod vyroben ze stejných polovodičových materiálů. K vývoji heteropřechodu je zapotřebí moderních metod vytváření tenkých polovodičových vrstev. Heteropřechody umožňují součástkám v optoelektronice zajistit vlastnosti, kterých homopřechod není schopen. Různé materiály polovodičových přechodů v heterostruktuře mají i různé zakázané pásy, což vytváří skoky v energetických pásech. Nespojitosť jednotlivých energetických skoků vznikají bariéry, které zabraňují toku elektronů či děr do některých oblastí v heteropřechodu. V P-N přechodu to napomáhá ke snížení podílu minoritních nosičů na proudu, čímž dojde ke zvýšení účinnosti injekce. Nespojitosť v energetických pásech heteropřechodu urychlují nosiče náboje nebo mohou být naopak využity k udržení nosičů náboje v požadovaném prostoru. Různá šířka zakázaného pásu

jednotlivých materiálů heterostrukturního polovodiče může být využita k vymezení oblasti, kde bude docházet ke generaci laserového záření a stejně tak i k absorpci optického záření. Laserové diody například používají dvojitou heterostrukturu tvořenou vrstvami P-P-N, z čehož prostřední vrstva P je z materiálu s úzkým zakázaným pásem.



Obrázek 9 Energetické pásové schéma heteropřechodu P-P-N (zdroj [2])

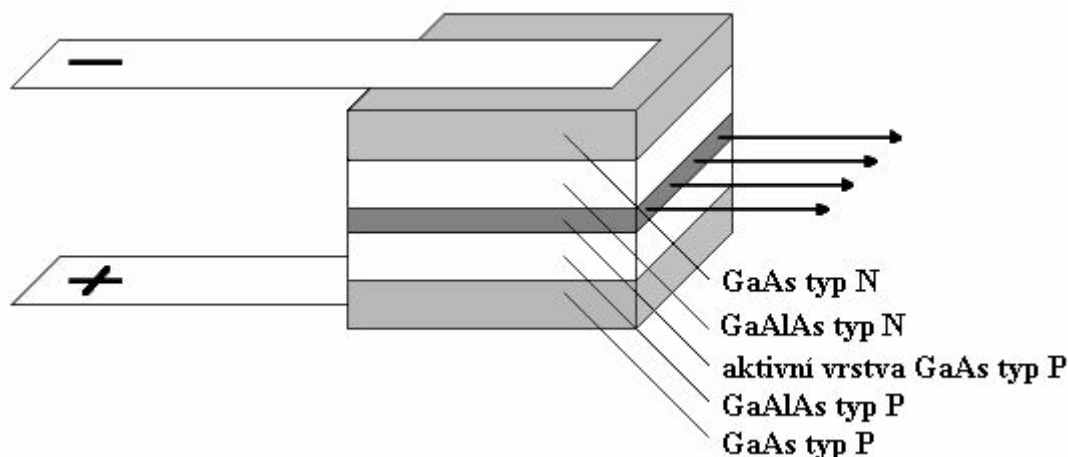
Laserové diody s heterostrukturou dělíme i podle počtu heterostruktur. Mohou být sestaveny z jednoduché heterostrukтуры (Obrázek 10) nebo dvojitě heterostrukтуры (Obrázek 11). Jednoduchá heterostruktura vytváří jednu ze stěn vlnovodu a současně i potenciálovou bariéru soustřeďující nosiče uvnitř aktivní vrstvy typu P. Skoková změna indexu lomu je zde mnohem větší než u homopřechodu. Přechodem PN a heteropřechodem je tím vymezen asymetrický vlnovod.



Obrázek 10 Jednoduchá heterostruktura (zdroj [7])

Aktivní vrstva laserových diod s dvojitou heterostrukturou má kolem sebe vrstvy s větší šířkou zakázaného pásu. Elektrony, díry i optické záření jsou soustřeďovány do aktivní oblasti z obou stran a je tak dosaženo vyšší účinnosti. Oblast, ve které dochází k rekombinaci,

je u laserových diod s dvojitou heterostrukturou přesně definována. Nedochází zde k toku nosičů náboje do ostatních vrstev. Nahromadění nosičů náboje v aktivní vrstvě s jejím malým průřezem až 100nm je tak velké, že režimu, kdy dochází ke generaci laserového záření, se dosahuje už při prahových proudech několika desítek mA. Účinnost je velmi vysoká, kolem 75%. [2][3][7]



Obrázek 11 Dvojitá heterostruktura (zdroj [7])

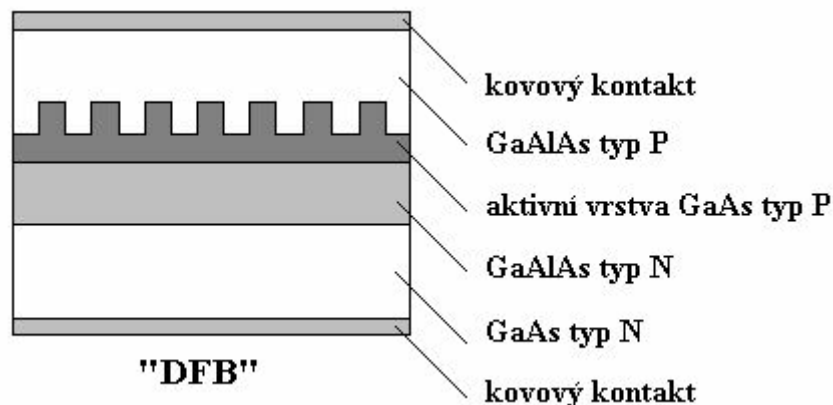
3.3 Laserové diody s kvantovými jámami

Tento typ může být s jednou kvantovou jámou nebo s více kvantovými jámami. Laserové diody s kvantovými jámami mají dvojitou heterostrukturou, která je vytvořena ultratenkou vrstvou (do 50 nm) polovodičového materiálu s užším zakázaným pásem než vrstvy, které tuto vrstvu obklopují. Tloušťka vrstvy je tak malá, že se mohou uplatňovat při generaci laserového záření i kvantové jevy. Již dlouhou dobu existují technologie, které umožňují vytvářet vrstvy složené jen z jedné atomové roviny. Jestliže jsou rozměry vrstvy srovnatelné s de Broglieho vlnovou délkou (v tepelné rovnováze elektronu), tak elektron může nabývat jen specifických hodnot. Tyto hodnoty mohou nabývat pouze velikostí násobků vlnové délky a rozměrů vrstvy. Ultratenká vrstva bývá třeba z GaAs obklopená AlGaAs. Tímto uspořádáním vrstev dojde ke vzniku pravoúhlých potenciálových jam ve vodivostním a valenčním pásu. V potenciálových jámách jsou pak elektrony a díry uzavřeny. Elektrony jsou uzavřeny v jámách vytvořených ve vodivostním pásu a díry zase v jámách valenčního pásu. [2][5]

3.4 Laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou

Tento typ laserových diod označovaný jako DFB (Distributed Feed Back) je tvořen optickým rezonátorem v podobě difrakčních mřížek. Nejsou zde použita žádná zrcadla. Po směru šíření optického záření se periodicky mění index lomu. Zpětná vazba je zde realizována Braggovským rozptylem. Braggovský rozptyl zajistí, že šířící se elektromagnetické vlny optickým rezonátorem jsou trvale navázány do opačného směru. Mřížka je leptaná přímo na

povrchu aktivní vrstvy laserové diody. Struktura laserové diody s rozprostřenou vazbou je zobrazena na Obrázek 12.



Obrázek 12 Struktura laserové diody s rozprostřenou zpětnou vazbou (zdroj [7])

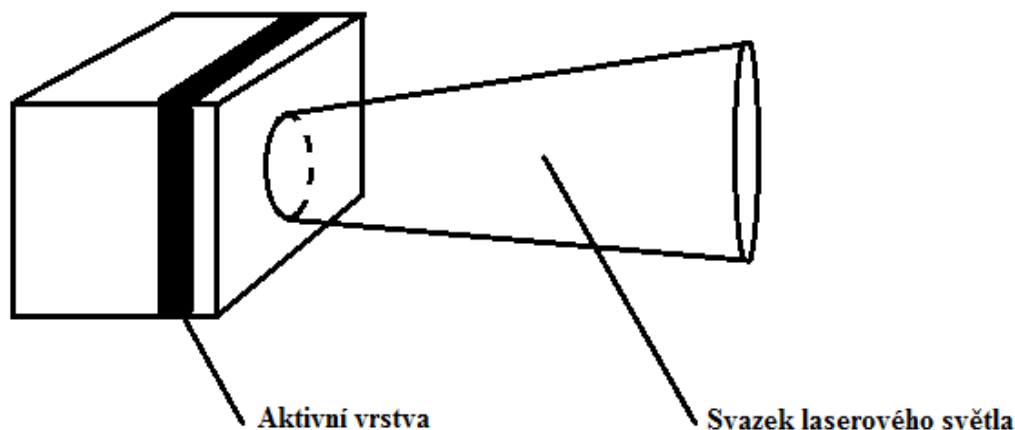
Další laserová dioda s rozprostřenou zpětnou vazbou je laserová dioda s rozloženým Braggovým zrcadlem. Lasery tohoto typu jsou označovány jako DBR (Distributed Bragg Reflector). Zde je optickým rezonátorem taktéž difrakční mřížka, ovšem generace laserového záření probíhá v samotných částech struktury. Každé rozhraní vrstvy laserové diody tohoto typu způsobuje částečné odrazy elektromagnetických vln. Vlny s vlnovou délkou blízkou velikosti čtyřnásobku tloušťky vrstvy interferují s odraženými. Vrstvy se pak chovají jako vysoce kvalitní optické rezonátory. Laserové diody tohoto typu jsou sestaveny z jednoho či dvou Braggových zrcadel, z čehož laserové diody s dvěma zrcadly se využívají nejvíce. Rozložené Braggovo zrcadlo je nedílnou součástí laserových diod s rozprostřenou zpětnou vazbou vyzařujících úzký svazek laserového světla. Používají se také v dutinových rezonátorech a optických dutinách ve vláknových laserech a laserech s volnými elektrony. [2][3][7]

3.5 Plošně vyzařující laserové diody

Jedním z typů generace laserového světla je plošné vyzařování. Takto vyzařující laserové diody nazýváme VCSEL diody (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Plošně vyzařovací laserové diody mají od hranově vyzařujících několik rozdílů. Jedním z nich je výhoda při výrobě, protože plošně vyzařující laserové diody se dají testovat již v procesu výroby. Hranově vyzařující laserové diody se mohou testovat, až je proces výroby dokončen. Pokud tedy dojde k nějakému problému s jednotlivými kontakty mezi vrstvami apod., nefunkčnost součástky se zjistí, až je laserová dioda vyrobena, čímž dojde ke ztrátě času zbytečným zpracováním součástky, která už je znehodnocena.

Jak je vidět ze zjednodušeného modelu laserové diody na Obrázek 13, laserové světlo je generováno kolmo s osou roviny přechodu laserové diody. Tento typ laserové diody

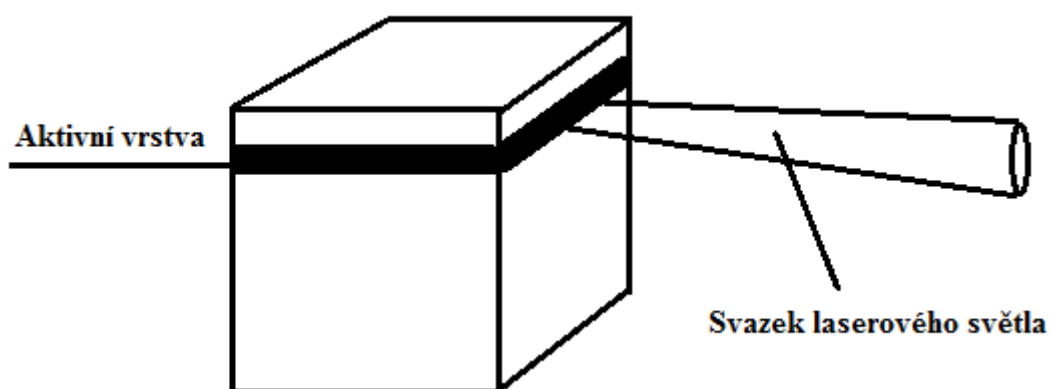
vykazuje větších účinností, než laserové diody hranově vyzařující. Pokud se tento typ diody nainstaluje jako generátor optického signálu pro optické vlákno, jeho účinnost může být až 80%. [5][7]



Obrázek 13 Plošně vyzařující laserová dioda [vlastní zdroj]

3.6 Hranově vyzařující laserové diody

Druhým a méně účinným typem jsou hranově vyzařovací laserové diody EEL (Edge Emitting Laser). Ke generaci laserového světla zde dochází na hraně přechodu laserové diody, tedy rovnoběžně s osou roviny aktivní vrstvy. [7]



Obrázek 14 Hranově vyzařující laserová dioda [vlastní zdroj]

4 PARAMETRY LASEROVÝCH DIOD

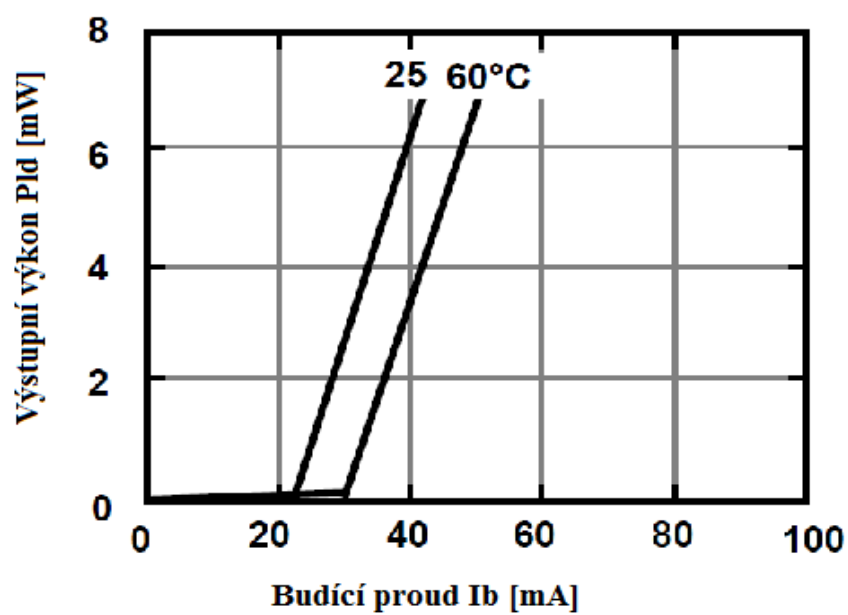
4.1 Spektrum

Jedním z mnoha důležitých parametrů laserových diod je jejich vyzařovací spektrum. Vyzařovací spektrum udává, jaké vlnové délky laserová dioda bude vyzařovat. Při výběru laserové diody mnohdy rozhoduje samotné spektrum laserové diody, protože každá aplikace či zařízení vyžaduje jiné vyzařované spektrum. Například pro použití v optických komunikacích jsou nejvíce využívány diody zářící na vlnových délkách 850, 1300 a 1550 nanometrů, z nichž laserové diody s vlnovou délkou 850 nm jsou v nejlepší cenové dostupnosti. Spektrum je dané strukturou diody a použitými materiály. Ze struktury diody to je optický rezonátor, který zesiluje dané vlnové délky a materiál určuje energetické pásy polovodičového laseru, tedy i vlnovou délku stimulovaného laserového záření (viz 1.2 o stimulované emisi). [1]

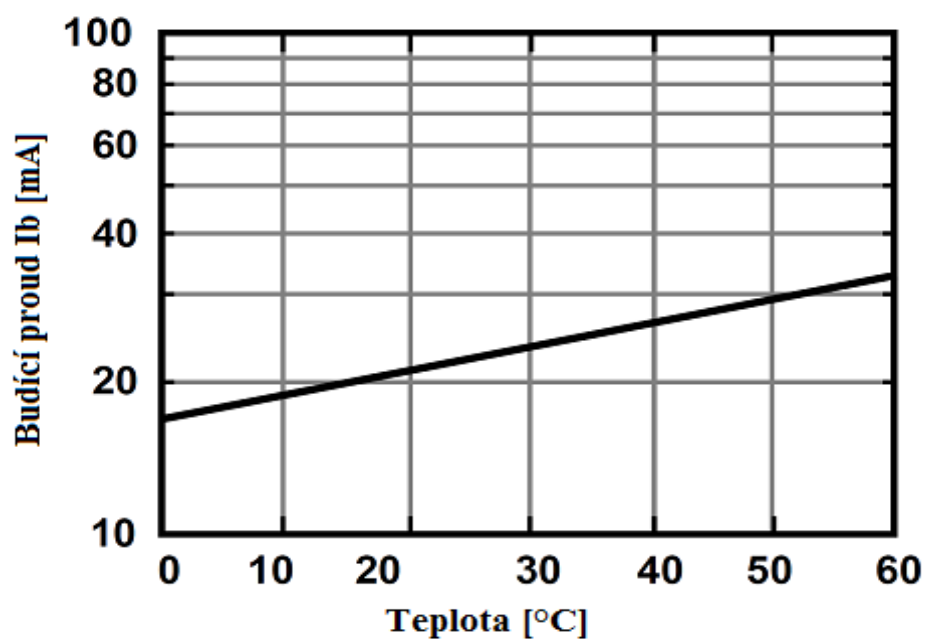
4.2 Optický výkon a budící proud

Dalšími důležitými parametry jsou výstupní optický výkon laserové diody a budící proud. Budícím proudem u laserové diody nastavujeme výstupní optický výkon podle L-I charakteristiky, jakou má daná dioda. Laserové diody se liší svými L-I charakteristikami a záleží na použitých materiálech a celkové struktuře diody. Do určitých malých hodnot budícího proudu buď laserová dioda nezáří, popř. ne plně laserové světlo – nedojde k inverzní populaci. Budící proud, při kterém dojde k stimulované emisi a požadované generaci laserového záření, se nazývá prahový proud. Ve výrobě laserových diod je vždy snaha vytvořit nejmenší prahový proud. Nízký prahový proud je známkou kvality laserové diody. Malý prahový proud znamená potřebu menšího budícího proudu ke generaci laserového záření, což je v praxi žádoucí. Na L-I charakteristice je důležitá také strmost lineární části za prahovým proudem. S velkou strmostí této lineární části stačí pro změnu většího optického výkonu malá změna budícího proudu.

Jak je vidět na obrázcích 15 a 16. Pro různé operační teploty má laserová dioda jinou závislost výstupního optického výkonu na budícím proudem. Při zvyšování teploty laserové diody v její struktuře dochází k aktivaci procesů, při kterých nedochází k optickému záření a ty přemění část vyzařovaného laserového světla na teplo. Nejlepší možnou variantou je teplotní nezávislost budícího proudu na teplotě. Dosáhnouti takto teplotně nezávislé diody je obtížné, pokud laserová dioda dosahuje vysokých výkonů nebo má složitou strukturu. Jedním z řešení může být kvalitní chlazení, například Peltierovým článkem. Ten by měl zajistit ustálení operační teploty diody a zamezit tak ke zvyšování její teploty. Jako příklad jsou uvedeny závislosti laserové diody LD-3149-057 firmy Sanyo vyzařující červené laserové světlo (670 nm). [1][3][8]



Obrázek 15 Závislost výstupního výkonu na budícím proudu (zdroj [9])



Obrázek 16 Závislost budícího proudu na teplotě laserové diody (zdroj[9])

4.3 Laserové světlo

Vysoká koherence, monochromaticnost a směrovost charakterizují laserové záření a vypovídají o vlastnostech jeho svazku. Koherence je podobnost dvou vln. Vlny se stejnou fází, amplitudou a frekvencí mohou mezi sebou interferovat, i když jsou z jiných optických zdrojů nebo se šíří po různých drahách a později se setkávají. Monochromaticnost se vyznačuje schopností vyzařovat jen úzké spektrum vlnových délek. Směrovost laserového světla je charakteristická malou rozbíhavostí na rozdíl od klasických zdrojů optického záření, jako je žárovka, která má velkou rozbíhavost světla. Tyto vlastnosti má laserový svazek laserové diody, který má mít v ideálním případě gaussovský tvar a symetrii stopy svazku kruhovou. Vlivem divergence ovšem dochází k rozdílu mezi svislou a vodorovnou částí svazku a svazek nebývá vždy symetrický, ale eliptický. K docílení kruhového svazku je potřeba užít správného nastavení pomocí optických čoček. Divergence se uvádí v úhlových stupních, a to v horizontální ose a vertikální ose symetrie stopy svazku. [4]

Pokud je symetrie Gaussovy stopy svazku eliptická, můžeme pro její výkon použít následující rovnici

$$\begin{aligned} P &= I(0,0,z) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{2x^2}{w_x^2(z)}\right)\right] dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(\frac{2y^2}{w_y^2(z)}\right)\right] dy \\ &= I(0,0,z) \frac{\pi}{2} w_x(z) w_y(z), \end{aligned} \quad (\text{Zroj}[1])$$

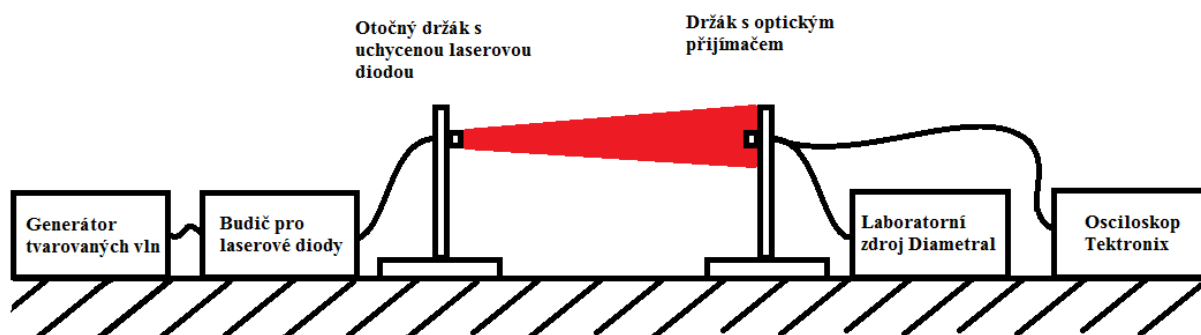
kde w označuje pološířku osy svazku x a y v závislosti na vzdálenosti z od krčku.

5 NÁVRH PRACOVISTĚ

5.1 Seznam potřebných přístrojů

- Budič pro laserové diody
- Optický detektor s aktivním filtrem (1026 Hz)
- Osciloskop Tektronix TDS 380
- Laboratorní zdroj Diametral P230R51D
- Generátor tvarovaných vln Agilent 33220A
- Laserová dioda LD-HL6722G (2mW)

5.2 Nákres a popis pracoviště



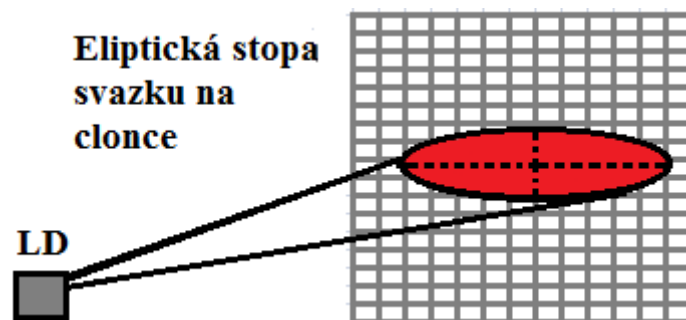
Obrázek 17 Pracoviště pro testování laserových diod [vlastní zdroj]

Na pracovní kovovou desku s otvory pro uchycení se našroubují držáky pro uchycení laserové diody a optického přijímače. Držák pro uchycení laserové diody má otočnou základnu s úhломěrem, kterým se nastavuje úhel vyzařování laserové diody kolem osy držáku. Pro proměření vertikální i horizontální osy je nutné dle potřeby otočit uchycenou diodu o 90°. Pro napájení laserové diody slouží budič laserových diod. Pro modulaci vysílaného signálu laserové diody je zapotřebí generátor tvarovaných vln napojený na modulační kanál budiče laserových diod. Optický detektor je tvořen fotodiodou s kruhovou aktivní plochou o průměru 2 mm a aktivním filtrem s propustí pro 1026 Hz. Optický detektor má symetrické napájení + 15 V a - 15 V z laboratorního zdroje Diametral a výstup pro přijímaný signál. Přijímaný signál bude přes výstup veden koaxiálním kabelem na vstup osciloskopu Tektronix, na kterém bude proměřen napěťový průběh přijímaného signálu.

5.3 Metoda měření

Cílem měření bude vyzařovací charakteristika laserové diody, symetrie stopy svazku a výkon laserové diody.

K získání vyzařovací charakteristiky laserové diody je zapotřebí změřit výkon pro různé úhly vyzařování laserové diody. Musí být zvolena vhodná vzdálenost mezi laserovou diodou a optickým detektorem, kdy bude symetrie stopy svazku dostatečně velká a dojde k měření s jemným krokem. Úhломěr se nastaví na 0° tak, aby na osciloskopu byl napěťový průběh s co největší amplitudou, což zajistí v dané ose střed stopy svazku s největší vyzařovanou intenzitou. Pomocí úhломěru se natáčí stojan kolem své osy s požadovaným krokem na obě strany od středu stopy svazku a proměří se až do poklesu napěťového průběhu k hodnotě vlastního šumu detektoru. Krok, ve kterém se bude úhломěr otáčet, je zapotřebí individuálně měnit. Svazek laserového světla vyzařující z laserové diody má, jak v ose horizontální i vertikální, nelineární průběh optické intenzity záření, což znamená, že je zapotřebí správně stanovit proměření stopy svazku, aby bylo měření praktické z hlediska rozumného množství naměřených hodnot. Vše se samozřejmě odvíjí od požadované přesnosti měření, které by mělo zachovat reálné informace o optické intenzitě v celé délce vertikální i horizontální osy laserového svazku. Důležité místo, které je vhodné pro nastavení jemnějšího kroku, je nejbližší v ose vyzařování, kde je optická intenzita záření největší a začíná od této osy relativně prudce klesat. Naopak pro nižší hodnoty optické intenzity, která se nachází blíže k okrajům vyzařovaného laserového svazku se hodnoty budou měnit po větších krocích, a proto je vhodné zvolit následně krok hrubší. Stejný postup bude následovat při proměření stopy svazku v obou osách. Symetrie stopy svazku laserových diod je v praxi eliptická, viz Obrázek 18.



Obrázek 18 Eliptická symetrie stopy svazku

Vyzařovací charakteristika bude zobrazena v trojrozměrném grafu obsahujícím závislost optické intenzity na horizontální a vertikální ose stopy svazku. Přijímaný signál získaný z výstupu optického detektoru bude zobrazen na osciloskopu, kde s pomocí měřících funkcí bude zobrazena efektivní hodnota napětí tohoto průběhu. Přijatý optický výkon se musí dopočítat z naměřeného napětí. Pro přepočet naměřeného napětí z průběhu výstupního signálu na optickém detektoru slouží jednoduchá rovnice

$$P = \frac{U}{S} \quad [2]$$

, kde U je efektivní napětí detekované na osciloskopu a $S = 3,2 \text{ MV/W}^{-1}$ je napěťová citlivost optického detektoru pro optické signály vlnové délky 670 nm a pro střední hodnotu přenosového pásma 1026 Hz.

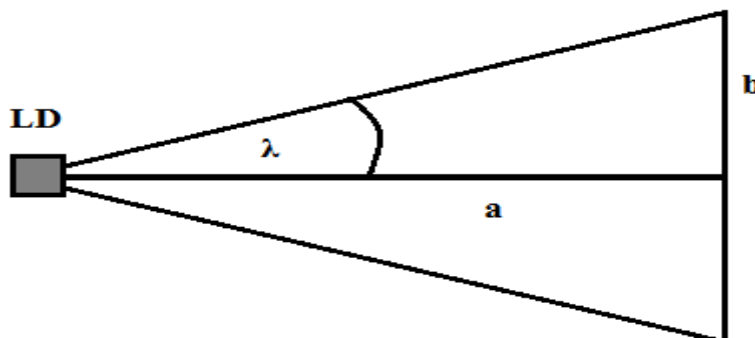
Pro získání vyzařovací charakteristiky laserové diody v trojrozměrném grafu je nutné proměřit závislost intenzity optického záření v ose horizontální i vertikální. Díky závislosti intenzity optického záření na úhlu vyzařování v obou osách dojde k dopočítání ostatních hodnot pomocí matematické funkce, čímž se vytvoří celá matice hodnot a znázorní následně v trojrozměrném grafu. K získání závislosti intenzity optického záření v jednotlivých osách bude sloužit série naměřených hodnot napětí, které budou přepočteny na přijatý optický výkon a následně se podělí aktivní plochou fotodiody optického detektoru a dostaneme intenzitu optického záření ve W/m^2 . Aktivní plocha fotodiody optického přijímače je kruhová a má průměr 2 mm. Se znalostí průměru aktivní plochy fotodiody je možné vypočítat její plochu podle vzorce pro výpočet obsahu kruhu. Výsledná vyzařovací charakteristika bude zdrojem dat pro určení krajních hranic symetrie stopy svazku, které lze vypočítat jako

$$K = I/e^2 \quad [3]$$

, kde I je intenzita ve středu stopy svazku, tj. v souřadnicích $x, y = 0$ a K je výsledná krajní intenzita. Známe-li hodnotu K , můžeme odečíst z grafu i úhel natočení, ve kterém se tato intenzita nachází. Pro obě osy tak máme určenou úhlovou symetrii stopy svazku.

Pro výpočet výkonu laserové diody ze známé optické intenzity celého svazku s eliptickým tvarem můžeme použít rovnici 1. Do této rovnice je třeba zakomponovat pološířky vyzařovaného svazku. Známe-li krajní úhel svazku λ a vzdálenost mezi laserovou diodou a plochou fotodiody, můžeme vypočítat tyto pološířky podle goniometrické funkce.

$$\text{tg}(\lambda) * a = b \quad [4]$$

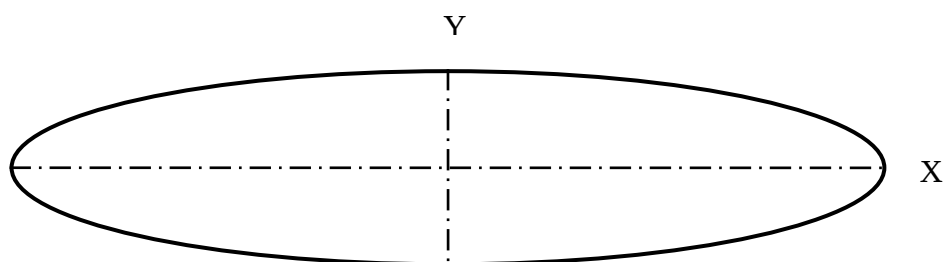


Obrázek 19 Profil svazku laserového světla

Na obrázku 19 je profil laserového svazku vyzařovaného z laserové diody. Vzdálenost a se určí podle potřeby a s naměřením krajního úhlu symetrie stopy svazku se může dopočítat

vzdálenost b , která bude odpovídat pološířce svazku. Tímto postupem se získají pološířky pro vertikální a horizontální osu.

Teoretický model eliptické symetrie stopy svazku je na obrázku 20. Reálná stopa svazku laserového světla generujícího diodou je ve skutečnosti blízka modelu elipsy, s čímž počítá i rovnice 1 pro výpočet optického výkonu laserového svazku dle známé optické intenzity záření.

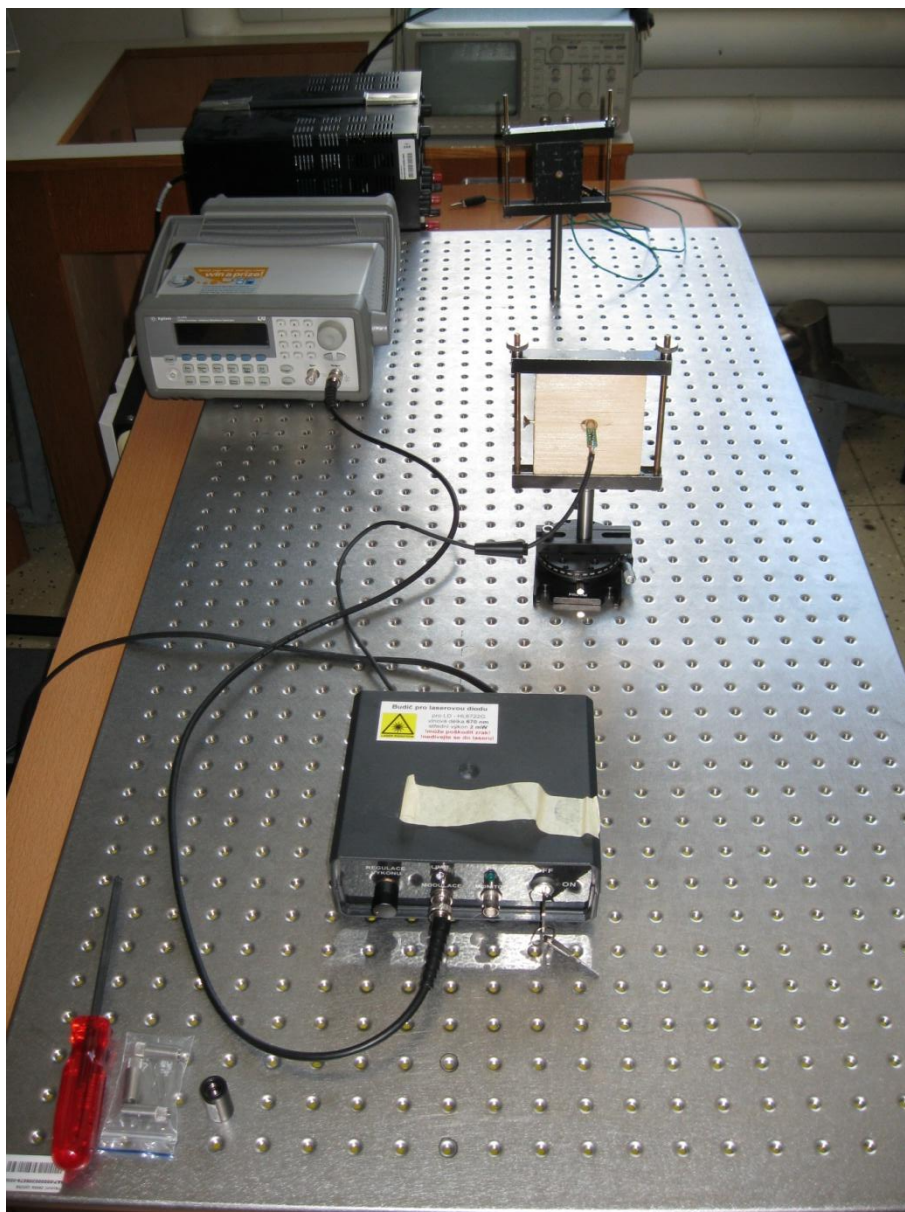


Obrázek 20 Eliptická symetrie stopy svazku

V praxi je nutné tuto eliptickou stopu svazku co možná nejlépe fokusovat optickou soustavou tak, aby vznikla kruhová symetrie stopy svazku. Nejvhodnější je pro tuto fokusaci použití cylindrických čoček. Používají se taktéž čočky sférické. Dnes už se vyrábí kvalitní umělohmotné čočky sloužící pro konstrukci kolimátorů včetně laserových diod. Kolimační čočky jsou koncipovány speciálně pro viditelné světlo a vykazují tak v tomto spektru vlnových délek vhodné kolimační vlastnosti. Díky různým disponibilním ohniskovým vzdálenostem jsou možné ke konstrukci systémy jak pro blízkou, tak i vzdálenou oblast. Pro blízkou oblast se nejvíce hodí fokusované systémy s čočkami, které mají kratší ohniskovou vzdálenost. Naopak pro vzdálenou oblast a následnou kolimaci jsou zapotřebí čočky s větší ohniskovou vzdáleností.

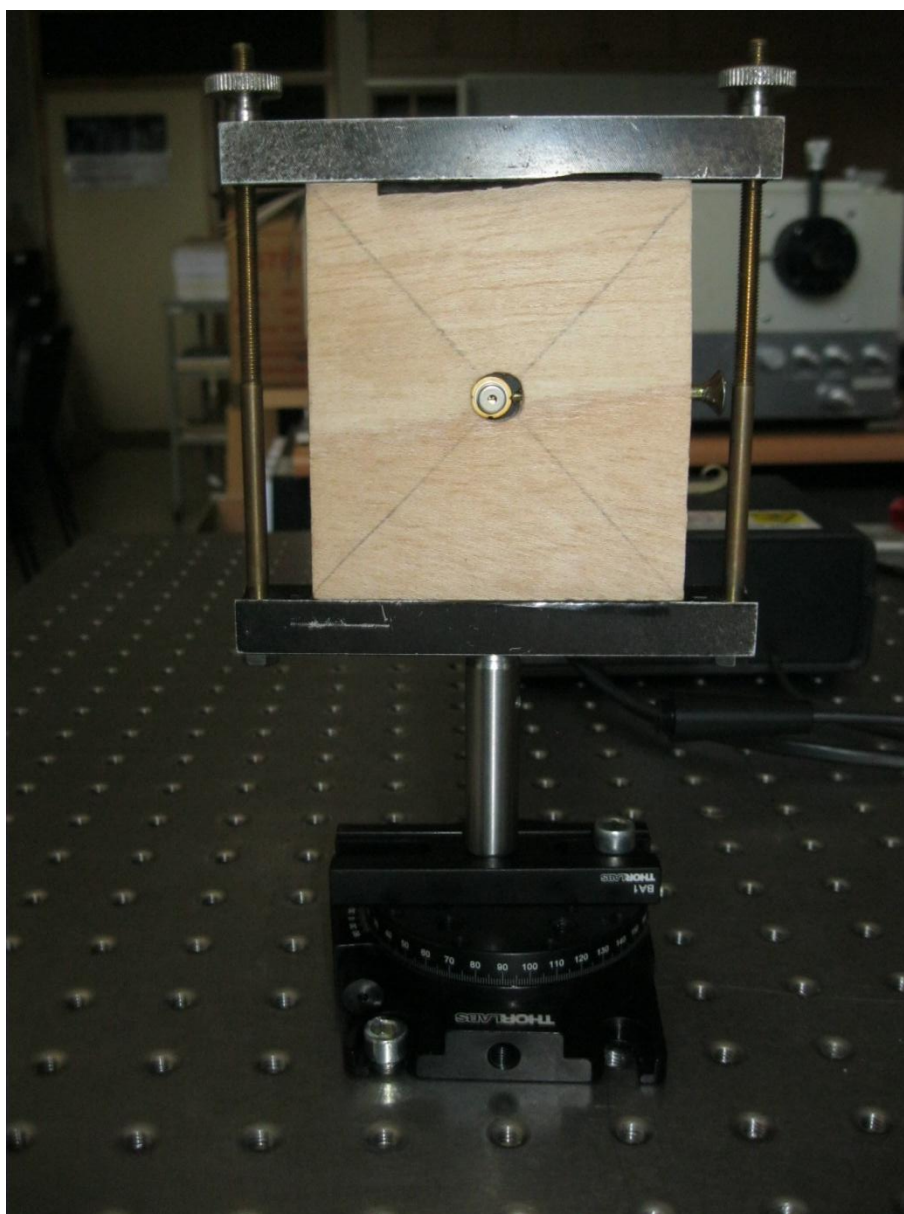
6 SESTAVENÍ PRACOVISTĚ

Základem pracoviště pro testování laserových diod je na pracovním stole umístěná kovová deska s otvory pro uchycení jednotlivých držáků. Otvory v desce mají závity, do kterých je možné zašroubovat šrouby připevňující sestavené držáky pevně k desce, aby nedošlo k volnému posuvu držáků na desce a tím k znehodnocení měření. Držáky byly sestaveny ze stavebnic v laboratoři s použitím vhodných nástavců, které umožnily co možná nejpřesnější zaměření laserové diody do osy přijímacího optického detektoru. Sestavené pracoviště je zaznamenáno na Obrázek 21.



Obrázek 21 Pracoviště pro testování laserových diod

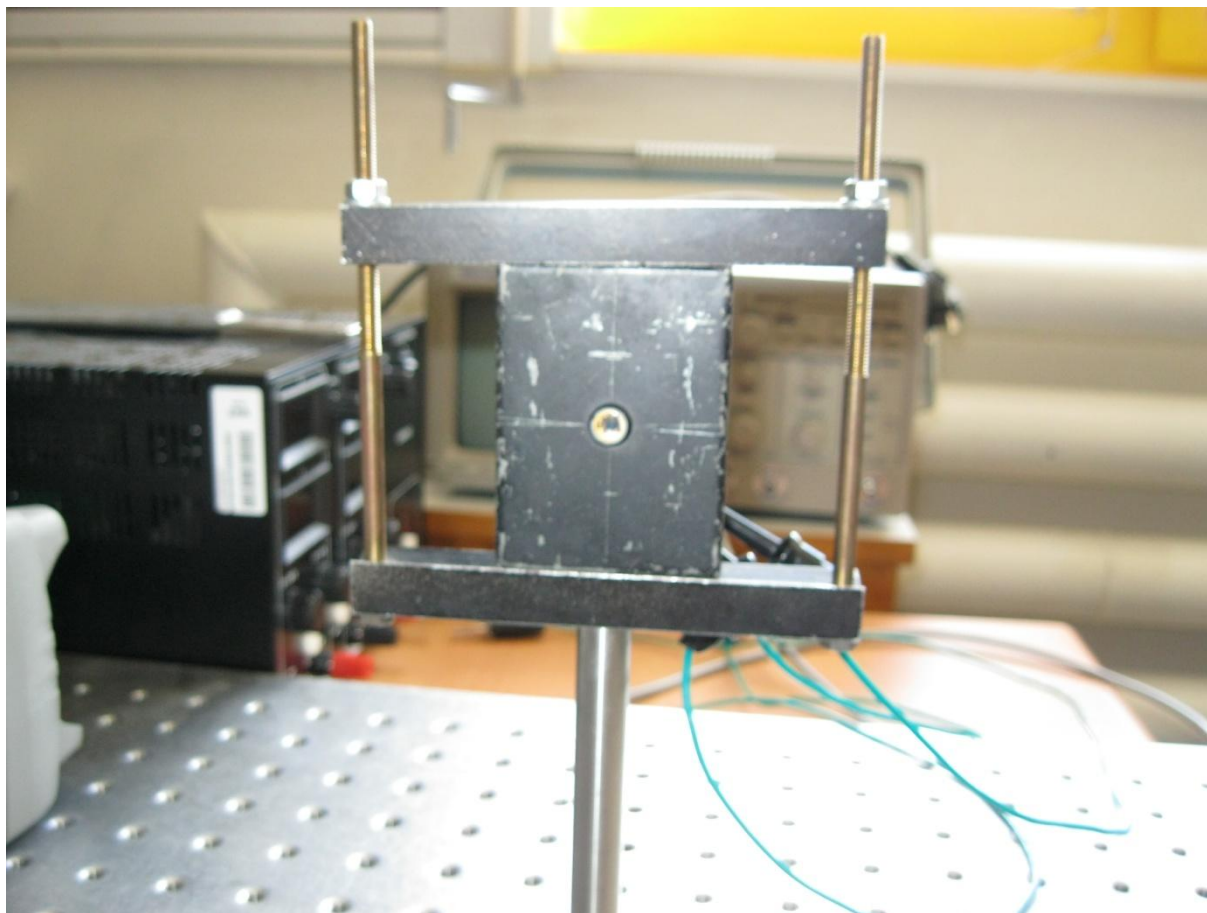
Dřevěná destička slouží k uchycení laserové diody mezi dva uchytovací kvádry držáku. Destička má uprostřed kruhový otvor, do kterého se laserová dioda zasadí a utáhne pomocí šroubu s vybroušeným koncem. Držák má otočnou základnu s úhloměrem, pomocí něhož lze po stupních krokovat měření a natáčet tak úhel vyzařování laserové diody podle potřeby. V případě velice jemného kroku lze využít mikrometru, který je nainstalován k úhloměru a umožňuje přesný posun držáků o úhlové minuty. Pro měření vyzařovací charakteristiky laserových diod však stačí použití krokování od $0,5^\circ$ a větší. Při měření laserové diody bylo použito odlišné krokování pro horizontální a vertikální osu. V případě proměrování horizontální osy postačil krok 1° a při větším úhlu otočení laserové diody, kdy stopa svazku vykazovala velmi malé změny optického výkonu, bylo použito krokování větší.



Obrázek 22 Držák s úchytnou destičkou pro laserovou diodu

Krokování by mělo být zvoleno intuitivně dle potřeby měření a charakteru vyzařovací charakteristiky měřené laserové diody při zachování potřebné přesnosti.

Program pro vyzařovací charakteristiku v trojrozměrném grafu zahrnuje funkci pro dopočítání hodnot v matici, kterou potřebuje pro vygenerování kompletního trojrozměrného grafu se závislostí optické intenzity na úhlech vyzařování laserové diody v jednotlivých osách. Pro proměření vyzařovací charakteristiky ve vertikální a horizontální ose stačí pro změnu měření na jinou osu otočit dřevěnou destičku v držáku o 90° a najít opět středový bod stopy laserového svazku s největší intenzitou, kde se měření nastaví jako bod 0° .



Obrázek 23 Optický detektor

Na Obrázek 23 je vidět optický detektor s aktivní plochou fotodiody o průměru 2 mm. Optický detektor disponuje aktivním filtrem pro střední hodnotu přenosového pásma s frekvencí 1026 Hz, což umožňuje měření namodulovaného signálu laserové diody bez rušení okolního osvětlení, aniž by byla potřeba zatemnit místnost. Budič laserové diody má modulační kanál, na který je možné přivést signál z generátoru tvarovaných vln (Obrázek 25), který umožňuje modulaci vyzařovaného optického signálu laserové diody. Na generátoru bylo nastaveno modulační napětí $U_{\text{RMS}} = 0,5 \text{ V}$ sinusového průběhu s frekvencí 1026 Hz. Optický detektor vyžaduje symetrické napájení $+15 \text{ V}$ a -15 V . Jako zdroj symetrického napájení byl použit laboratorní zdroj Diametral (Obrázek 24) s možností spřažení svorek obou obsažených napájecích zdrojů. Na obou zdrojích se nastavilo napětí 15 V a tlačítkem A+B se aktivovalo spřažení svorek $+$ a $-$, což vytvořilo společnou zem pro oba zdroje.



Obrázek 24 Laboratorní zdroj Diametral



Obrázek 25 Generátor tvarovaných vln Agilent

Aktivní filtr v optickém detektoru zastává transimpedanční zesilovač s vhodným nastavením pasivních součástek. Transimpedanční zesilovač vyžaduje právě toto symetrické napájení +15 V a -15 V. Optický detektor má tedy 2 napájecí vstupy a jednu zemnicí svorku. Pro monitorování výstupního signálu a získání napětového průběhu převedeného fotodiodou z optického signálu na signál elektrický slouží výstup s koaxiálním konektorem, na který je možné připojit osciloskop snímající tento průběh. Pro měření napětového průběhu přijímaného signálu byl použit osciloskop Tektronix (Obrázek 26).



Obrázek 26 Osciloskop Tektronix

Samotná optická intenzita záření v měřeném bodě stopy svazku se tímto měřením nezíská. Osciloskop ukazuje pouze napětový průběh efektivního napětí, který je adekvátní optickému signálu vyzařovaným laserovou diodou. K získání optické intenzity je nutné toto efektivní napětí v jednotlivých úhlech vyzařování laserové diody přepočítat na výkon, a to s pomocí jednoduchého vzorce zahrnujícího napětovou citlivost optického detektoru na dané vlnové délce, který je nutný pro tento výpočet. Optický detektor (Obrázek 23) má pro vlnovou délku 670 nm vyzařující laserovou diodou napětovou citlivost $S = 3,2 \text{ MV/W}^{-1}$. Výpočet přijatého optického výkonu se provede podle rovnice 3. Vypočítaný optický výkon se pak přepočítá na optickou intenzitu. Optický výkon se tedy podělí velikostí aktivní plochy fotodiody optického detektoru.

7 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT VE VYTVOŘENÉM PROGRAMU

7.1 Naměřené hodnoty

Vyzařovací úhel [°]	Detekované napětí U [mV]	Vyzařovací úhel [°]	Detekované napětí U [mV]
-46	2,67	1	76,18
-41	3,31	2	72,87
-36	5,25	3	77,31
-30	7,94	4	74,04
-26	10,96	5	71,01
-24	13,89	6	81,69
-22	16,12	7	66,96
-21	19,98	8	64,33
-20	22,97	9	65,06
-19	25,14	10	54,18
-18	27,97	11	53,59
-17	30,51	12	52,13
-16	33,46	13	44,56
-15	37,21	14	44,16
-14	40,17	15	39,76
-13	43,87	16	36,63
-12	47,42	17	32,58
-11	51,42	18	29,79
-10	54,07	19	27,15
-9	58,32	20	24,47
-8	60,15	21	21,78
-7	65,96	22	20,17
-6	67,71	24	14,86
-5	72,73	26	11,08
-4	72,83	30	11,51
-3	75,22	36	5,74
-2	74,47	41	3,49
-1	68,52	46	0
0	80,13	-	-

Tabulka 1 Naměřené hodnoty - horizontální osa

Měřícím postupem uvedeným v kapitole 5.3 Metoda měření se naměřily hodnoty potřebné k zpracování v programu, který vytvoří z těchto hodnot vyzařovací charakteristiku v trojrozměrném grafu. Tabulka 1 obsahuje naměřené hodnoty pro horizontální osu laserového svazku. Stopa svazku byla podle teoretických předpokladů v horizontální ose širší než osa vertikální a bylo nutné změřit více hodnot, které postačují kvalitnímu zpracování v programu a vytvoří tak vyzařovací charakteristiku s vhodnou přesností. Hodnoty naměřené v ose

vertikální byly změřeny s jemnějším krokem a to po $0,5^\circ$, protože zde docházelo k prudšímu poklesu optické intenzity od středu stopy laserového svazku. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 2.

Vyzařovací úhel [°]	Detekované napětí U [mV]	Vyzařovací úhel [°]	Detekované napětí U [mV]
8	2,51	-0,5	78,92
7,5	3,37	-1	66,24
7	6,48	-1,5	58,42
6,5	10,65	-2	51,15
6	15,51	-2,5	46,02
5,5	20,76	-3	36,67
5	27,75	-3,5	31,13
4,5	33,04	-4	23,25
4	41,51	-4,5	18,18
3,5	49,83	-5	13,33
3	57,76	-5,5	8,58
2,5	67,83	-6	4,57
2	74,19	-6,5	3,21
1,5	73,75	-7	1,58
1	78,79	-7,5	0
0,5	80,34	8	0
0	80,13	-	-

Tabulka 2 Naměřené hodnoty - vertikální osa

7.2 Program s grafickým výstupem

Pro zpracování naměřených hodnot byl vytvořen skript v matematicko-vědeckém programu Matlab. Skript má název `Laser_diode` a obsahuje grafický výstup pro vyzařovací charakteristiku měřené laserové diody v trojrozměrném grafu, symetrii stopy svazku určenou výpočty ze zpracovaných hodnot naměřených na pracovišti a počítá výkon laserové diody.

První částí skriptu `Laser_diode` je konfigurace. V této části skriptu uživatel zadá naměřené hodnoty a jim odpovídající vyzařovací úhly laserové diody. Pro horizontální osu slouží vektory $\mathbf{x}$ a $\mathbf{xz}$, kde za vektor $\mathbf{x}$ dosadíme úhly a za $\mathbf{xz}$ dosadíme naměřené hodnoty. Délky jednotlivých vektorů musí být stejné, tzn. pokud v některém úhlu není hodnota změřena, je potřeba doplnit hodnotu nulou. Pokud budou rozdílné, program vypíše chybovou hlášku o špatné délce vektorů. Aby uživatel mohl pohodlně zadávat hodnoty v naměřených mV, je v konfigurační části přidán přepočít na V, který je vhodný pro další výpočty v základních jednotkách. Uživatel si musí dát také pozor na oddělování desetinných míst. V Matlabu je třeba zapisovat čísla s desetinnou tečkou, nikoli čárkou. Uživatel musí také zadat vzdálenost mezi měřenou laserovou diodou a optickým přijímačem, která je potřebná pro

následující výpočty v programu. Posledním nastavením je detail, který udává krok interpolace. Čím nižší číslo, tím větší přesnost. Pro správné vykreslení a vhodné vyobrazení symetrie stopy svazku se použije detail = 0,5 a pro přesnější a hladší vykreslení samotné vyzařovací charakteristiky je lepší použít krok nižší. Příklad konfigurační části skriptu je uveden níže.

```
%konfigurace
```

```
x = [];           %úhly
xzz = [];         %hodnoty změřeného napětí v mV
xz=xzz/1000;      %převod změřených hodnot na V

y = [];           %úhly
yzz = [];         %hodnoty změřeného napětí v mV
yz=yzz/1000;
vzd = 0.47;       %vzdálenost mezi laserovou diodou a fotodiodou v metrech
detail=0.2;       %nastavení kroku interpolace
```

Po zadání naměřených hodnot do konfigurační části programu, potřebné konfigurace vzdálenosti a kroku interpolace, následuje samotná interpolace, která doplní hodnoty nezměřených úhlů v kroku podle zvoleného detailu a taktéž interpoluje těmito úhly hodnoty napětí.

```
%hledání maximálního úhlu natočení
xmax = max(abs(min(x)),max(x));
xmin = -xmax;
ymax = max(abs(min(y)),max(y));
ymin = -ymax;

%interpolace úhlů podle detailu
xuhel_detail = xmin:detail:xmax;
yuhel_detail = ymin:detail:ymax;

%uložení dopočítaných hodnot pomocí interpolace s nakonfigurovaným krokem
xintp = interp1(x,xz,xmin:detail:xmax,'cubic');
yintp = interp1(y,yz,ymin:detail:ymax,'cubic');
```

Pro zpracování hodnot a dopočítání celé matice potřebné v zobrazení trojrozměrného grafu vyzařovací charakteristiky byla vytvořena funkce, která vytváří koeficienty poklesu naměřeného napětí v horizontální ose vůči hodnotě ve středu stopy svazku. Vznikne vektor posloupností pro koeficienty poklesu a těmito koeficienty se poté násobí hodnoty změřené v ose vertikální a doplní se tak horizontální osa každé změřené hodnoty v ose vertikální. Tato funkce vyžaduje stejnou hodnotu ve středu osy 0° pro obě naměřené osy. Vzhledem k nejistotě měřicího přístroje je nemožné při druhém měření najít přesně stejnou hodnotu, protože měřené napětí na osciloskopu kolísá. Proto je zapotřebí najít nejbližší hodnotu napětí v ose vertikální i horizontální pro úhel vyzařování 0° a tyto hodnoty zprůměrovat. Odchylka je řádově v setinách mV. Všechny změřené hodnoty napětí se v programu přepočítají na

výkon pomocí rovnice 2 a následně je pak každá hodnota optického výkonu podělena aktivní plochou fotodiody optického přijímače, čímž se získá optická intenzita v daném bodě.

```
%výpočet výkonu U/(S x 3,14R^2)
S = 3200000; %napěťová citlivost fotodiody v W/V
R=0.001; %poloměr aktivní plochy fotodiody v m
xintp = xintp / (S*pi*(R^2)); %přepočet napětí na intenzitu
yintp = yintp / (S*pi*(R^2));

rat = xintp / xintp(round(length(xintp)/2)); %hodnota intenzity v bodě
<0,0>

%výpočet matice chybějících hodnot přes koeficienty naměřených hodnot
i=0;
z=zeros(length(xintp),length(yintp));
for r = rat
    i=i+1;
    z(i,:)=yintp*r;
end
Z=z';
```

Po výpočtu matice s hodnotami intenzit ve všech bodech odpovídajících vyzařovacím úhlům v obou osách se vykreslí trojrozměrný graf znázorňující vyzařovací charakteristiku laserové diody, viz Obrázek 27.

```
%vykreslení grafu
[X,Y] = meshgrid(xuhel_detail, yuhel_detail);
mesh(X,Y,Z);
figure(1);

title('Vyzařovací charakteristika laserové diody')
xlabel('Horizontální osa - úhel natočení [°]');
ylabel('Vertikální osa - úhel natočení [°]');
zlabel('Optická intenzita [W/m^2]');
```

Pro zobrazení symetrie stopy svazku bylo zapotřebí vypočítat pokles intenzity podle rovnice 3. Tímto výpočtem se získají kraje stopy svazku v úhlech. Vypočítaná hodnota se hledá v interpolovaných naměřených hodnotách a porovnává v cyklech a začíná se hledat od nejnižší intenzity. Jakmile se najde hodnota větší, než hodnota vypočítaného poklesu pro kraj stopy svazku, program vyjede z cyklu a zapíše poslední uloženou hodnotu intenzity, pro kterou pak vyhledá odpovídající úhel ve vektoru s interpolovanými úhly. Přesnost výpočtů se zvětšuje při snižování hodnoty detailu v konfiguraci. Krajní úhly stopy svazku se vypíší do okna v programu Matlab.

```
%hranice intenzity
hranice= xintp(round(length(xintp)/2)) / exp(1)^2;

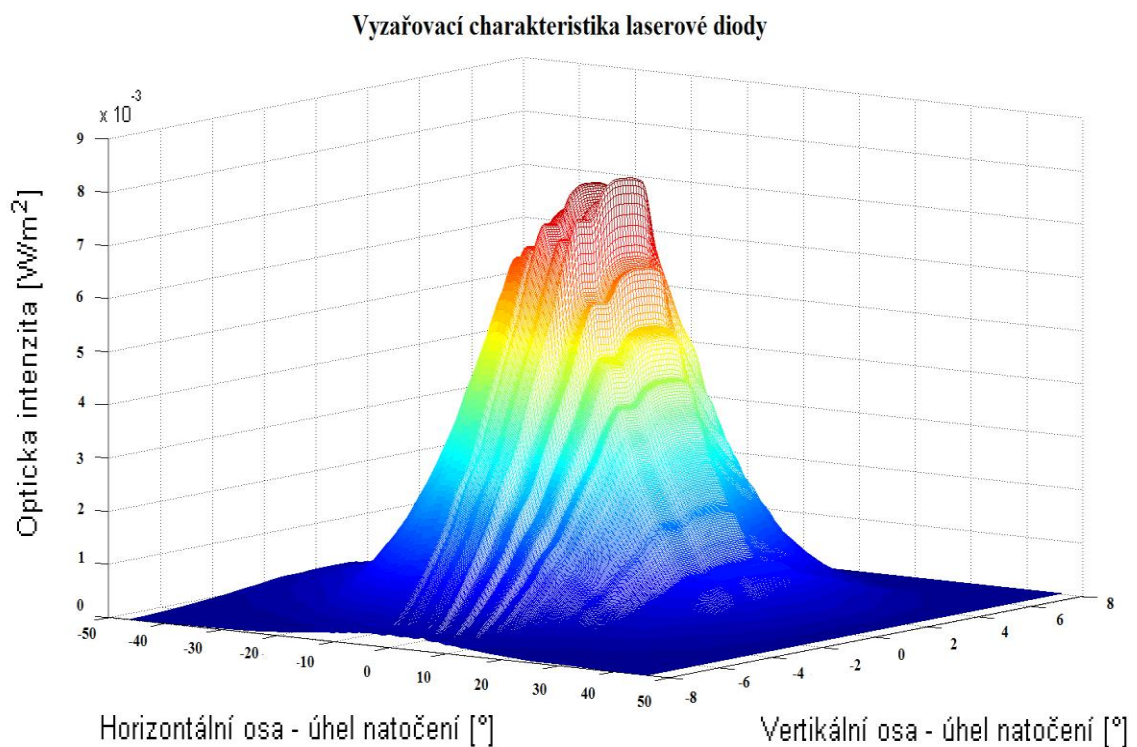
ix=1;
for xh = xintp
    if xh > hranice , break, end
    ix = ix+1;
end
```

```

iy=1;
for yh = yintp
    if yh > hranice , break, end
    iy = iy+1;
end

KrajniUhelStopy_x = abs(xuhel_detail(ix))
KrajniUhelStopy_y = abs(yuhel_detail(iy))

```



Obrázek 27 Vyzařovací charakteristika laserové diody

Pro přepočítání krajních úhlů na metry se využije goniometrické funkce tangens jako v rovnici 1. Tyto hodnoty v metrech se v programu využijí na výpočet výkonu laserové diody. Elipsa se vytvoří z hodnot krajních úhlů, aproximuje symetrii stopy svazku a ta je potom vložena do grafu s barevně rozlišenou intenzitou ve stopě svazku (Obrázek 28). Část skriptu pro vykreslení grafu symetrie stopy svazku:

```

%eliptická symetrie stopy svazku podle změřených hodnot
figure(2);
[X,Y] = meshgrid(xuhel_detail, yuhel_detail);
mesh(X,Y,Z);
t=linspace(0,2*pi,1000);
a=KrajniUhelStopy_x;
b=KrajniUhelStopy_y;
x=a*cos(t);
y=b*sin(t);

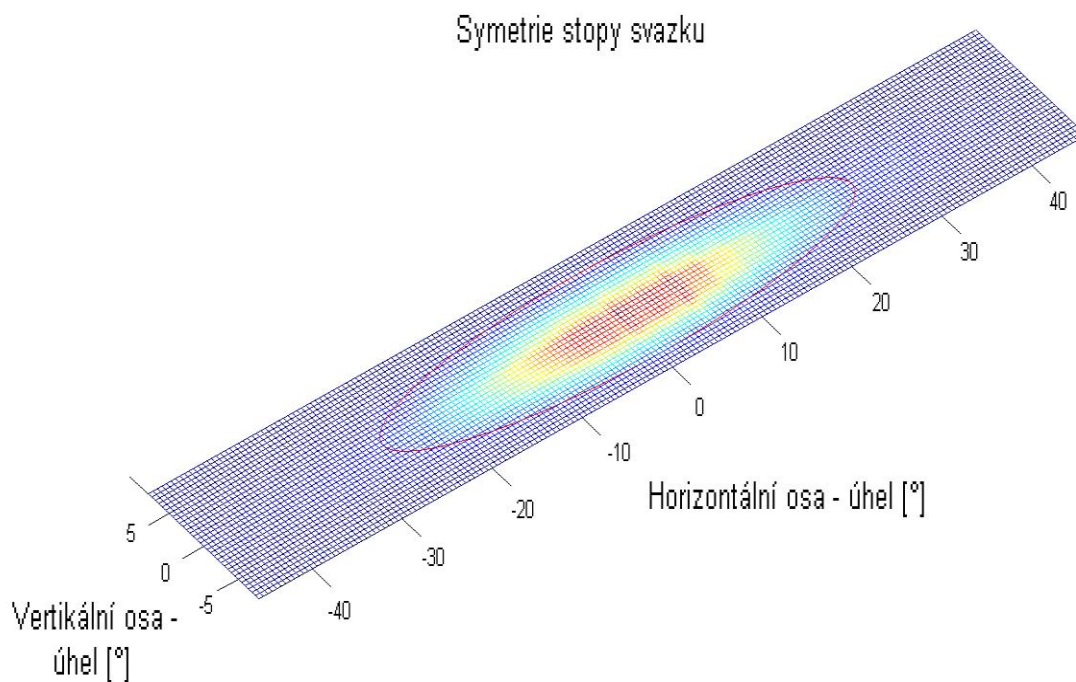
```

```

s1=(x(1)+x(500))/2;
s2=(y(1)+y(500))/2;
s=[s1;s2];
hold on ;
plot(x,y,'r');
plot(s1,s2,'x');
hold off;
axis equal;
title('Symetrie stopy svazku')
xlabel('Horizontální osa - úhel [°]');
ylabel('Vertikální osa - úhel [°]');

```

Jak je vidět v grafu symetrie stopy svazku, stopa má eliptický tvar a aproximace elipsou je tedy relativně přesná. V grafu je vyznačena červenou čarou aproximace elipsou. Na stopě je patrná velká intenzita poblíž středu s prudkým poklesem ke krajním hodnotám. Stejně tak můžeme pozorovat tento pokles ve vyzařovací charakteristice laserové diody, kde je díky trojrozměrnému grafu pokles a tvar svazku patrnější.



Obrázek 28 Symetrie stopy svazku

Poslední částí programu Laser_diode je výpočet výkonu laserové diody. Stejně jako předchozí důležité hodnoty jako krajní úhly stopy svazku a jejich přepočet na metry při nastavené vzdálenosti se vypočítaný celkový výkon podle rovnice 1 vypočítá a zobrazí v okně programu Matlab. Skript pro výpočet celkového výkonu laserové diody:

```
%výpočet pološířek svazku
PolosirkaSvazku_wx = tand(KrajniUhelStopy_x)*vzd
PolosirkaSvazku_wy = tand(KrajniUhelStopy_y)*vzd

%výpočet výkonu laserové diody ve W
P = xintp (round(length(xintp)/2)) * (pi/2*PolosirkaSvazku_wx*
PolosirkaSvazku_wy
```

Výsledný výkon laserové diody byl programem vypočten jako **P = 1,5 mW**. Hodnota se liší od katalogové, která uvádí 2 mW. Reálný výkon laserové diody se ovšem může lišit a s ohledem na chyby měřících přístrojů a nedostatky při výrobě laserových diod je tato hodnota přijatelná.

POUŽITÁ LITERATURA

Knihy a publikace

- [1] WILFERT, Otakar. *Kvantová a laserová elektronika*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012, 141 s. ISBN 978-80-214-4493-5.
- [2] SALEH, B. *Základy fotonik 3*. Praha: MATFYZPRESS, 1991, 330 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [3] FILKA, Miloslav. *Optoelectronics: for telecommunications and informatics*. Dallas: OPTOKON CO., LTD., 2009, 398 s. ISBN 978-0-615-33185-0.
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [5] POLLOCK, R. *Fundamentals of optoelectronics*. Chicago: Irwin, 1995, 569 s. ISBN 02-561-0104-3.

Internetová literatura

- [6] LUKÁŠ, Michal.] Laserové diody 1: Princip funkce laserových diod. [online]. 2001, č. 1 [cit. 2012-12-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [7] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody 2: Typy a struktury laserových diod. [online]. 2001, č. 1 [cit. 2012-12-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [8] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody 3: Parametry laserových diod a jejich měření. [online]. 2001, č. 3 [cit. 2012-12-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02023/index.html>
- [9] SANYO. *Red laser diode: DL-3149-057*. Tachikawa, 2000. Dostupné z: <http://www.princetel.com/datasheets/670%20nm%20DL-3149-057.pdf>
- [10] Laser diode. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-12-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode

ZÁVĚR

V bakalářské práci je probrána teorie k pochopení principu funkce laserových diod a jejich parametrů, návrh pracoviště s metodikou měření, jeho sestavení a vyhodnocení naměřených hodnot v programu s grafickým výstupem. Pro pochopení funkce laserových diod jsou uvedeny kapitoly o energetických procesech jako absorpce a stimulovaná emise, a poté přímo jejich funkce. Bakalářská práce pojednává i o strukturách a typech injekčních polovodičových laserů. Dále seznamuje s důležitými parametry, které pomohly k ucelení vědomostí a následujícímu návrhu pracoviště. V práci je seznam použitých měřících přístrojů potřebných k měření na pracovišti pro testování laserových diod. Náskres a popis sestavení pracoviště s následnou realizací a dokumentací práce jsou také v práci obsaženy. Pracoviště bylo experimentálně ověřeno a naměřené hodnoty pro měřenou laserovou diodu HL6722G jsou zpracovány ve vytvořeném programu s grafickým výstupem, který umožňuje zobrazení vyzařovací charakteristiky laserové diody v trojrozměrném grafu, symetrii stopy svazku a výkon laserové diody přepočtený z optické intenzity laserového svazku diody.

Naměřené hodnoty jsou použity a zpracovány v programu s ohledem na chyby měřících přístrojů. Z grafického výstupu programu zobrazující vyzařovací charakteristiku jsou vidět patrné rozdíly od teoretických průběhů laserového svazku, který mimo jiné v některých případech uvažuje čistě kruhovou symetrii stopy svazku. Ve vyzařovací charakteristice jsou také patrné výkyvy optické intenzity záření, které je možné vidět i v tabulce naměřených hodnot. Měřená laserová dioda pracuje na vlnové délce 670 nm, která patří do viditelného spektra optického záření, což umožnilo kontroly stopy v zatemněném prostoru. Stopa vykazovala známky nehomogenit. Na některých místech vznikaly kruhové obrazce se slabší intenzitou laserového světla. Pravděpodobně se jedná o příčinu nečistot v aktivní vrstvě laserové diody a je tak důvodem menšího spočítaného výkonu laserové diody. Symetrie stopy svazku laserové diody a její okraje aproximované elipsou jsou po získání a výpočtu dat z naměřených hodnot zobrazeny v grafickém výstupu. Ze známé optické intenzity ve středu laserového svazku a spočítaných pološírek svazku je pak nakonec spočten výkon laserové diody, který se lišil od katalogových údajů, ovšem tato hodnota je přijatelná v rámci chyb měřících přístrojů a nedostatků při výrobě laserových diod.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a	Odvěsna
b	Odvěsna
λ	Úhel alfa
eV	Potenciálový rozdíl
N_0	Počet základních kvantových stavů
N_1	Počet vybuzených kvantových stavů
P	Přijatý optický výkon
S	Napěťová citlivost
U	Detekované napětí na osciloskopu
DBF	Distributed Feed Back
DBR	Distributed Bragg Reflector
EEL	Edge Emitting Laser, hranově vyzařující laser
LASER	Light Amplified by the Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode, dioda emitující světlo
LD	Laser Diode, laserová dioda
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser, plošně vyzařující laser