

Úloha 6 - Zdroje optického záření a jejich vlastnosti

Úloha je zaměřena na studium vlastností různých zdrojů optického záření, především superluminiscenčních diod (LED) a laserové diody (LD). U zdrojů optického záření budou studovány vyzařovací charakteristiky a spektra emitovaného záření. U laserové diody bude studována závislost emitovaného záření na teplotě, proudu protékající diodou a dalších parametrech. Dále budou studována reflexní spektra různých povrchů, která budou měřena pomocí reflexní sondy.

1 Teoretický úvod

Spektroskopie

Spektroskopie je obor fyziky zaměřený na studium spektra, které vzniká v procesu interakce mezi látkou a elektromagnetickým vlněním. Její význam spočívá v tom, že spektrum každé látky je složeno ze souboru charakteristických spektrálních čar, který studovanou látku jednoznačně určuje. Prostřednictvím spektroskopie lze studovat kvantové přechody a usuzovat na energetické hladiny atomů, molekul a makroskopických soustav, a tak získat informaci o stavbě a vlastnostech látky; např. lze pomocí spektroskopie analyzovat prvky obsažené ve vzorku látky, získat informace o složení hvězd a galaxií (astronomická spektroskopie) atd. Spektroskopie lze dělit podle různých hledisek: např.

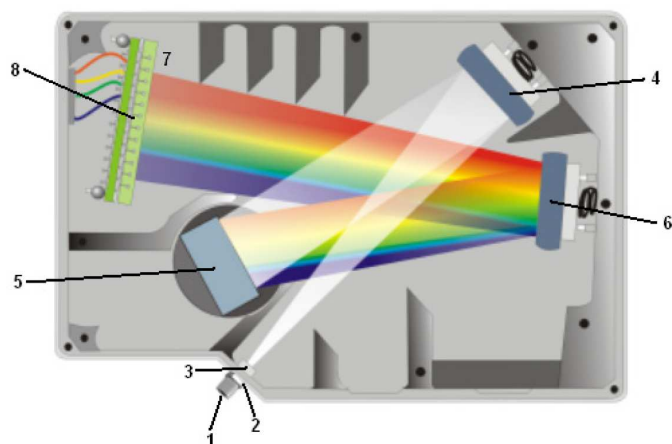
- **podle vlnových délek elektromagnetického záření obsažených ve studovaném spektru** ji dělíme na: radio-spektroskopii, submilimetrovou spektroskopii, optickou spektroskopii (pokrývá oblast optických vlnových délek a lze ji dále členit na infračervenou spektroskopii, spektroskopii viditelného záření a ultrafialovou spektroskopii), rentgenovou spektroskopii, spektroskopii gama záření,
- **podle studovaných látek** na atomovou spektroskopii (zkoumá atomová spektra), molekulovou spektroskopii (molekulová spektra), spektroskopii krystalů atd.,
- **podle charakteru spektra** na emisní spektroskopii, absorpční spektroskopii, ramanovskou spektroskopii, fluorescenční spektroskopii atd. Nově rozvíjející se oblastí spektroskopie je zejména laserová spektroskopie, využívající laserového záření pro získání a studium spekter. Zvláštním druhem spektroskopie (z hlediska vln. délek) je jaderná spektroskopie - lze ji dále dělit na gama-, alfa- a beta-s.

V této úloze se budeme zabývat optickou spektroskopií (tedy oblasti UV/VIS). Budeme mít k dispozici spektrometr, který nám umožňuje měřit vlnové délky v rozsahu 200 až 1100 nm. Princip fungování spektrometru je zobrazen na obr. 1.

Naším úkolem v této úloze bude naměřit optická spektra různých optických zdrojů a dále reflexní spektra různých povrchů. Pro měření transmisních i reflexních spekter bude použit spektrometr OceanOptics HR4000 [2].

Zásadním parametrem každého spektrometru je **optické rozlišení**, tedy nejmenší změřitelná šířka spektra měřená (nejčastěji) na polovině maxima (Full Width Half Maximum - FWHM). Optické rozlišení závisí na mřížkové periodě, respektive hustotě čar/mm, ale také na vstupní pupile systému (v našem případě optické vlákno nebo šterbina). Velikost použité šterbiny ovlivňuje rozlišení spektrometru. Při použití malé šterbiny je dobře definována plocha, ze které vstupuje záření do spektrometru a jednotlivé spektrální čáry lze dobře rozlišit. Zároveň je ale potřeba vysoká intenzita dopadajícího záření. Pokud potřebujeme detekovat slabý signál je nutné použít šterbinu o větším průměru a tedy snížit rozlišení spektrometru. Výrobce u daného modelu udává maximální rozlišení 0,02nm (velikost šterbiny $5\mu\text{m}$). Pokud potřebujeme vysokou citlosti přístroje klesne rozlišovací schopnost přístroje na 8,4nm (velikost šterbiny $200\mu\text{m}$). Výměnu vstupní šterbiny provádí pouze výrobce, který zároveň provede kalibraci spektrometru. Spektrometr využitý pro měření v praxi je opatřen vstupní šterbinou o průměru $10\mu\text{m}$. Další parametry spektrometru OceanOptics HR4000 jsou uvedeny v tab. 1.

Vlastní měření, zejména u emitujících zdrojů, probíhá pomocí optického kabelu (např. s vláknem tloušťky $600\mu\text{m}$). Naměřené spektrum je dáno nejen spektrálními vlastnostmi zdroje záření, ale je také ovlivněno přenosovými vlastnostmi použitého optického kabelu. Tuto přenosovou charakteristiku je nutné zohlednit, pro získání správných vyzařovacích spekter zdrojů záření. Přenosové charakteristiky vlákna použitého při měření jsou uvedeny na obr. 2. Při měření úlohy v praxi tuto závislost nezohledňujte.



OBRÁZEK 1: **Princip spektrometru:** Světlo vstupuje pomocí optického vlákna do spektrometru. Divergující svazek je kolimován sférickým zrcadlem na rovinnou mřížku. Dochází k difrakci na mřížce a světlo je fokuzováno sférickým zrcadlem. Obraz spektra je zobrazen na jedno-dimenzionální CCD čip a získaná data jsou přenesena do PC pomocí A/D převodníku. 1- SMA konektor; 2 - štěrбина; 3 - filtr; 4 - kolimační zrcadlo; 5 - mřížka; 6 - fokuzáčnı zrcadlo; 7 - detektorové kolečkı čočky; 8 - CCD detektor.

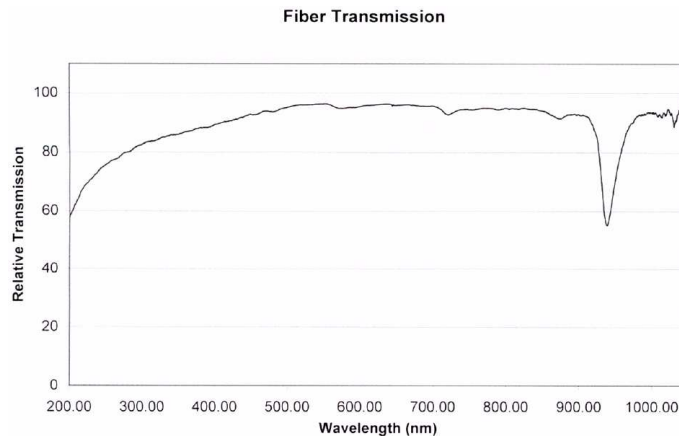
Parametr	Hodnota
Detektor	Toshiba TCD1304AP lineární CCD pole
Počet prvků	3648 pixelů
Citlivost	100 fotonů / vyčtenı čipu (pro $\lambda = 800\text{nm}$)
Velikost pixelu	$8 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$
Velikost potenciálové jámy pixelu	-100,000 elektronů
Poměr signálu a šumu	300:1 (at full signal)
A/D resolution	14 bit
Dark noise	8 RMS counts
Linearita (po korekci)	>99.8%
Maximální frekvence vyčıtání	1 MHz
Integrační doba	3.8 ms až 10 s
Velikost vstupní apertury	$10 \mu\text{m}$
Optické rozlišení	$0.27 \mu\text{m}$

TABULKA 1: Parametry spektroskopu OceanOptics HR4000 [2].

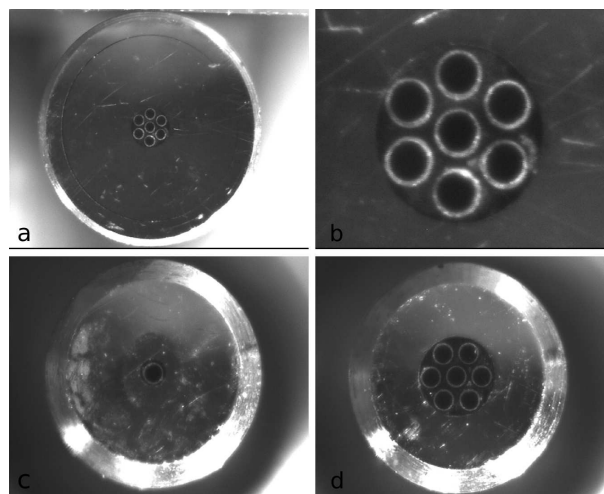
Pro získání spektrální informace difúzně či přímo reflektujících povrchů se užívá reflexní sonda. Světlo z referenční lampy (např. wolframová halogenka) je vedeno optickým kabelem do sondy, od povrchu odražené světlo je samostatným vláknem vedeno zpět do spektrometru. Získání reflexního spektra je založeno na difúznım odraze. Výstupní apertura reflexní sondy je zobrazena na obr. 3a-b. Záření vystupuje z šesti vláken po obvodu a odražené záření je odváděno do spektrometru vláknem umístěným uprostřed. Na obr. 3d je zobrazen detail konektoru, který je připojen k halogenové lampě a slouží k přivedení optického záření do reflexní sondy. Na obr. 3c je zobrazen konektor kterým je reflexní sonda připojena ke spektrometru. Optická vlákna použitá v reflexní sondě mají průměr $230 \mu\text{m}$.

Pojmy související s úlohou

Spektrální čára - záření, jehož spektrální hustota výkonu nabývá nenulových hodnot pouze v blízkém okolí jediné vlnové délky. Hlavními parametry popisujícími spektrální čáru jsou vlnová délka, šířka a intenzita spektrální čáry. Vlnová délka spektrální čáry je dána konkrétním kvantovým přechodem, který je zdrojem daného záření. U monochromatických zdrojů je za vlnovou délku spektrální čáry považována vlnová délka, na které je dosaženo maxima intenzity záření. Souvislost intenzity se spektrální hustotou výkonu záření vyjadřuje



OBRÁZEK 2: Přenosová charakteristika optického vlákna OceanOptics.



OBRÁZEK 3: Detail vstupních apertur reflexní sondy OceanOptics. a) Reflexní sonda; b) Detail reflexní sondy; c) Výstupní apertura konektoru, který je připojen ke spektrometru; d) Vstupní apertura vlákna, které slouží k osvětlení vzorku.

vztah

$$I = \int_{\lambda} e(\lambda) d\lambda$$

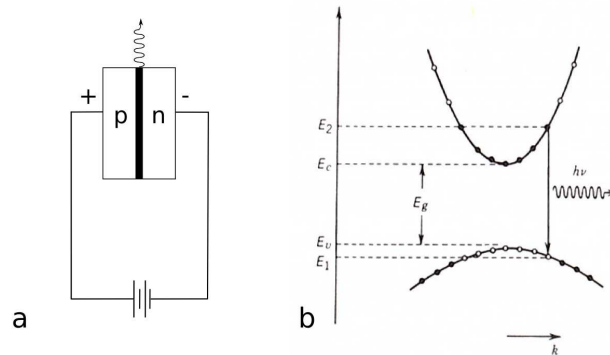
(integrace se provádí přes nenulovou oblast spektr, hust. výkonu $e(\lambda)$). Některé spektrální čáry se v optice označují písmeny latinské abecedy podle německého fyzika Fraunhofera (1787 až 1826), který tyto spektrální čáry zjistil při pozorování spektra slunečního záření

Šířka spektrální čáry - parametr charakterizující spektrální čáru, resp. monochromatické záření, které této čáře odpovídá. Šířka spektrální čáry je definovaná jako interval frekvencí, ve kterém je spektrální hustota výkonu větší než polovina maximální hodnoty. S rostoucí monochromaticností záření se šířka spektrální čáry zmenšuje a maximální hodnota spektrální hustoty výkonu se zvětšuje. Nulová šířka spektrální čáry by odpovídala dokonale monochromatickému záření. Ve skutečnosti má každá spektrální čára nenulovou šířku. Jako spektrální přístroj s prostorovým rozlišením vlnových délek se používají monochromátor, spektroskop, spektrometr, spektrofotometr. K současnému rozlišení většího počtu spektrálních čar se používají mnohokanálové spektrální přístroje, např. polychromátor či spektrograf, který dovoluje zaznamenat výřez ze spojitého spektra.

Zdroje optického záření

V úloze budou studovány optické vlastnosti různých zdrojů záření. Hlavní důraz bude kladen na studium vlastností luminiscenčních diod a laserové diody. Shrňeme proto základní pojmy a vlastnosti

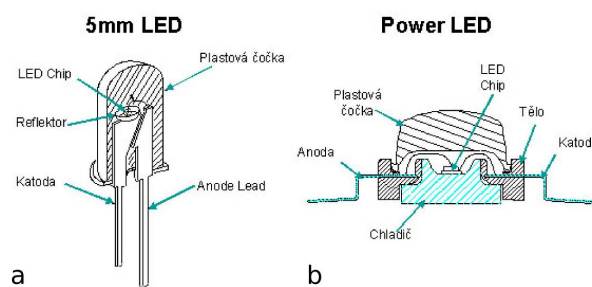
LED – je zkratka pro light emitting diode. Dioda bývá také označována jako luminiscenční nebo superluminiscenční dioda. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Dioda je opatřena přechodem PN, na který je přiloženo napětí v propustném směru (obr. 4a). V důsledku přiloženého napětí dochází k injekci minoritních nosičů náboje přes PN přechod. Po překonání určité vzdálenosti tyto nosiče rekombinují s nosiči opačného znaménka. Tento proces způsobuje v aktivní oblasti uvolnění energie ve formě fotonů.



OBRÁZEK 4: a) Struktura luminiscenční diody; b) Spontánní emise fotonu jako výsledek rekombinace elektronu o energii E_2 s dírou o energii $E_1 = E_2 - h\nu$. Přechod je znázorněn vertikální šipkou.

Spontánní emisi záření v luminiscenční diodě lze popsat pomocí energetického diagramu (obr. 4b). V oblasti PN přechodu dochází k přechodu elektronu z energetické hladiny E_2 na hladinu E_1 (rekombinace s dírou). Rozdíl energií obou hladin je vyzářen ve formě fotonů o energii $h\nu = E_2 - E_1$, kde h značí Planckovu konstantu a ν frekvenci emitovaného záření. Energie E_g značí zakázaný energetický pás. Teorie polovodičových zdrojů záření je důkladně popsána např. v [1].

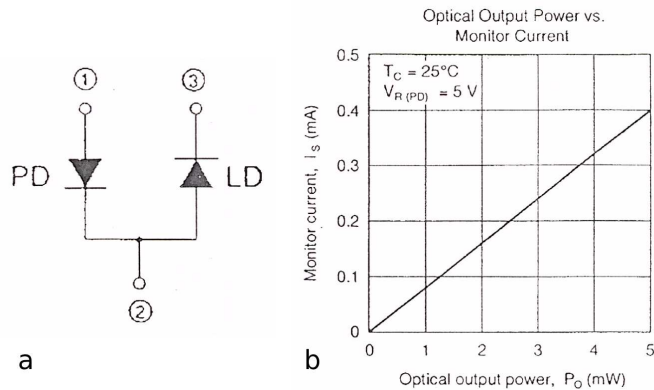
V praxi jsou využívány dva typy LED: plošně vyzářující a hranově vyzářující (obr. 5). Plošně vyzářující umožňují dosáhnout vyšší vyzářovací výkon, který může být mnohonásobně větší než výkon hranově vyzářujících LED a proto jsou plošně vyzářující diody využívány v osvětlovací technice. Při měření spektrálních vlastností LED se seznámíte s oběma typy diod.



OBRÁZEK 5: a) Hranově vyzářující LED ; b) Plošně vyzářující LED [5].

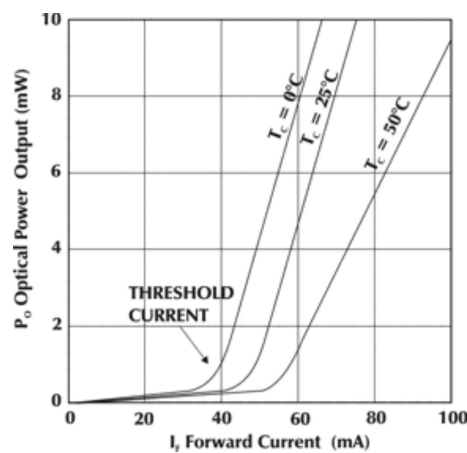
LD – je zkratka pro laser diode. Jedná o polovodičový laser. Uspořádáním se neliší od LED, ale jeho funkce je založena na vzniku stimulované emise optického záření v polovodičích při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu a existenci zářivé rekombinace nosičů náboje elektronů a děr. Inverze populace hladin je dosaženo injekcí nosičů náboje přechodem PN (injekční laser).

V pouzdře laserové diody jsou umístěny dvě diody označované LD a PD (obr. 6a). Diody LD je samotná laserová dioda sloužící ke generaci laserového záření. Diody PD je zapojena v závěrném směru a slouží k monitorování výkonu LD. PD tedy slouží k detekci záření - po dopadu záření na PD začne touto protékat proud, z jehož velikosti lze určit výkon vyzařovaný diodou. Pro zjištění hodnoty vyzařovaného výkonu je ke každé diodě dodáván datasheet s grafem závislosti výstupního výkonu na proudu procházejícím PD diodou (obr. 6b). Na základě tohoto grafu je nutné před prvním použitím zkalibrovat řídicí jednotku, kterou je řízena a napájena LD.



OBRÁZEK 6: a) Vnitřní schéma laserové diody HL6312; b) Závislost proudu protékající diodou PD na intenzitě záření emitovaného LD (Dioda HL6312).

Laserová dioda emituje záření až po překročení určitého prahového proudu. Typický průběh závislosti výstupního výkonu laserové diody je uveden na obr. 7. Po překročení prahového proudu je závislost vyzářeného výkonu na proudu lineární.



OBRÁZEK 7: Závislost prahového proudu a výstupního výkonu LD na proudu protékající diodou pro různé teploty LD.

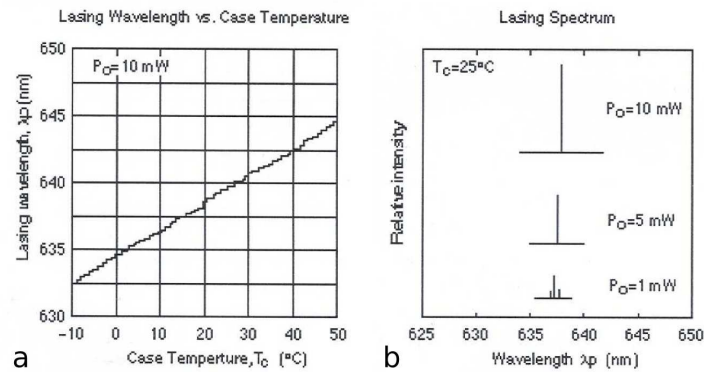
Polovodičové lasery jsou velmi citlivé na změnu teploty. Práh generace laseru (the lasing threshold) se mění s teplotou. Mění se provozní teplota laseru má za následek řadu efektů:

1. mění se prahový proud - prahový proud roste s teplotou, nad prahovým proudem dioda přechází na stimulovanou emisi,
2. mění se diferenciální citlivost - s rostoucí teplotou klesá diferenciální účinnost tzn. klesá výstupní výkon.

Spektrum laserových diod je závislé na teplotě (obr. 8a). S rostoucí teplotou (krystal se roztahuje a index lomu materiálu se zvětšuje) se posouvá spektrum směrem k vyšším hodnotám vlnových délek. V podstatě

se jedná o drift jednotlivých podélných módů. Jelikož je spektrum teplotně závislé, bude se měnit také s rostoucím proudem laserové diody v propustném směru (roste Joulovo teplo a čip LD se více zahřívá). Při změnách proudu pak můžeme pozorovat přelévání části energie z jednoho podélného módu do druhého, tedy nespojitě změny vlnové délky hlavního píku. Tento jev se nazývá "mode hopping". Tento jev je dominantní pro laserové diody s Fabry-Perotovým rezonátorem.

Spektrum diody závisí nejen na teplotě diody, ale také na výkonu emitované diodou. Při zvyšování výkonu diody dochází ke změně šířky spektrální čáry (obr. 8b). Přestože je dioda udržována na konstantní teplotě dochází v důsledku většího proudu protékající diodou k ohřevu diody a mění se vlnová délka emitovaného záření.



OBRÁZEK 8: a) Závislost emitované vlnové délky záření na teplotě laserové diody; b) Závislost emitovaného spektra na výstupním výkonu LD při konstantní teplotě LD. (Oba grafy jsou pouze ilustrativní a nedopovídají diodě měřené v této úloze.)

Měřená laserová dioda je umístěna v soklu TCLDM9 od firmy Thorlabs [3], který je ovládán řídicí jednotkou ThorLabs ITC 502 [4]. Sokl je opatřen Peltierovým článkem, který umožňuje regulovat teplotu LD v rozsahu 0 až 70°. Maximální chladicí výkon Peltierova článku je 20 W ($U=4\text{V}$, $I=5\text{A}$). Použitá řídicí jednotka ITC 502 však dodává maximální proud 2 A a dosažitelný chladicí výkon je tedy nižší.

Řídicí jednotka slouží také k nastavení velikosti proudu procházejícím LD a s tím související vyzařovaný výkon. Jednotku lze provozovat ve dvou režimech: 1) v proudovém, kdy je ovládána hodnota proudu procházejícím LD; 2) ve výkonovém, kdy je řídicí jednotka zkalibrována pomocí údajů z grafu 6b a lze nastavovat přímo hodnoty výkonu LD.

2 Zadání úlohy

Postup měření:

1. Vlastnosti laserové diody

- (a) Seznamte se datasheety laserové diody, soklu TCLDM9 a řídicí jednotky ITC 502. Na jejich základě rozhodněte o správném umístění diody s ohledem na polaritu napětí přiloženou na jednotlivé vývody diody. (S datasheety se není nutné seznamovat v rámci domácí přípravy).
- (b) Umístěte diodu do soklu a na přepínačích soklu a řídicí jednotky nastavte správnou polaritu.
- (c) Řídicí jednotku zkalibrujte pomocí grafu na obr. 6b tak, aby výkon uvedený na řídicí jednotce odpovídal reálnému výstupnímu výkonu LD. Postup je popsán v návodu řídicí jednotky, který je umístěn u přístroje.
- (d) Nastavte na řídicí jednotce limitní proud procházející LD na 80mA, aby nedošlo v průběhu měření k poškození diody.
- (e) Proveďte měření závislosti prahového proudu LD v závislosti na teplotě LD. Teplotu měňte od rozsahu od 0 do 50°C stupňů. Vyneste do grafu závislost vyzařovaného výkonu na proudu protékající diodou pro jednotlivé teploty (viz. obr. 7). Do tabulky uveďte hodnoty prahového proudu a určete směrnici přímky v oblasti generace laserového záření (diferenciální účinnost), kdy je tato závislost lineární. Optický výkon detekujte pomocí detektoru umístěném na optickém stole. Dbejte na to, abyste u detektoru nedosáhli saturace.
- (f) Proměřte úhlovou vyzařovací charakteristiku LD pro směr horizontální a vertikální. Závislosti vyneste do grafu v polárních souřadnicích. Grafy vyneste tak, aby maximální intenzita záření odpovídala hodnotě 0°. Vysvětlete rozdíl mezi horizontální a vertikální úhlovou závislostí. Určete úhel vyzařování pro oba dva směry, jako úhel ve kterém poklesne intenzita záření na polovinu maxima.

2. Spektrální charakteristiky

- (a) Seznamte se s principem činnosti a základními postupy měření spektra pomocí spektrometru HR4000 od firmy OceanOptics a řídicím programem SpectraSuite.
- (b) Proměřte spektrální charakteristiku laserové diody: určete polohu a šířku spektrální čáry LD v závislosti na teplotě. Měření proveďte při konstantním výkonu pro teploty od 0 do 50°C. Měření provádějte ve výkonovém režimu pro hodnotu výkonu 3mW. Při měření dbejte na to, aby nedocházelo k saturaci spektrometru a následnému poškození.
- (c) Proveďte měření závislosti polohy a šířky spektrální čáry LD pro různé hodnoty výkonu při konstantní teplotě 25°C.
- (d) Proveďte proměření emisních charakteristik různých zdrojů optického záření, jak monochromatických, tak polychromatických, koherentních i nekoherentních podle aktuálních instrukcí na laboratorním stole (hranově a plošně vyzařující LED, halogenová lampa, kalibrační lampa, zářivka, HeNe laser, UV lampa). Výsledky měření spekter zaznamenejte, zpracujte a vyneste do grafů.
- (e) U monochromatických zdrojů určete vlnovou délku spektrální čáry a šířku spektrální čáry. U kalibrační lampy určete vlnové délky hlavních spektrálních čar a porovnejte je s přiloženými spektry od výrobce.

3. Měření reflexních spekter

- (a) Seznamte se s reflexními sondami, které jsou k dispozici na optickém stole.. Sondu zapojte do spektrometru a jako zdroj osvětlení vzorku použijte halogenovou lampu.
- (b) Sejměte referenční spektra a přepněte program SpectraSuite do módu měření reflexních spekter.
- (c) Zaznamenejte reflexní spektra různých povrchu pro úhel dopadu 45°. Reflexní spektra vyneste do grafu. Pokuste se vysvětlit abnormalitu v reflexním spektru “zvýrazňovačů”.

3 Požadované výsledky:

Po provedení experimentu na základě uvedeného popisu sepište protokol o měření. Protokol musí mimo jiné obsahovat následující údaje

1. Stručný popis měření s LD.
2. Grafy závislosti výstupního výkonu diody na proudu protékající diodou pro různé teploty. Hodnoty odpovídajících prahových proudů a diferenciálních účinností.
3. Grafy úhlových vyzařovacích charakteristik LD, vyzařovací úhly LD.
4. Stručný popis provedení měření pomocí spektrometru HR4000 Ocean Optics pro případ měření emisních spekter.
5. Závislost polohy a šířky spektrální čáry LD na teplotě. Hodnoty vynesete do tabulky a do grafu.
6. Závislost pohybu a šířky spektrální čáry LD na výkonu. Hodnoty vynesete do tabulky a do grafu.
7. Naměřená spektra jednotlivých zdrojů, diskuse k naměřeným výsledkům. Vlnové délky a šířky spektrálních čar. Určené hlavní vlnové délky kalibrační lampy.
8. Stručný popis měření reflexních spekter.
9. Naměřená reflexní spektra jednotlivých povrchů, diskuse k naměřeným výsledkům.

Reference

- [1] SALEH B. E. A., TEICH M. C. *Základy fotoniky 3*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-05-7.
- [2] HR4000 High-Resolution Spectrometer
<<http://www.oceanoptics.com/Products/hr4000.asp>>
- [3] TCLDM9 - TE-Cooled Mount For 5.6 & 9 mm Lasers
<<http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=TCLDM9>>
- [4] Laser Diode / TEC Controllers ITC502
<http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=27&pn=ITC502-IEEE>
- [5] LED - světelné diody (Light Emitting Diodes)
<<http://www.elkovo-cepelik.cz/dalsi/teorie—svetelna-technika/led—svetelne-diody-light-emitting-diodes.htm>>