

Pracovné úlohy

1. Změřte současně světelnou i voltampérovou charakteristiku polovodičového laseru. Naměřené závislosti zpracujte graficky. Stanovte prahový proud i_0 .
2. Pomocí Hg výbojky okalibrujte stupnici monochromátoru SPM 2. Diskutujte, proč je volena velmi úzká štěrbina monochromátoru.
3. Změřte emisní spektrum polovodičového laseru při několika hodnotách proudu laserem pod a nad odhadnutou prahovou hodnotou i_0 . Určete vlnovou délku stimulované emise a kvalitativně diskutujte změny ve spektrech provázející změnu napájecího proudu.
4. Při jedné nadprahové hodnotě proudu laserem změřte emisní spektrum polovodičového laseru při různých teplotách laseru. Vyhodnoťte teplotní závislost vlnové délky stimulované emise a výstupního výkonu.
5. Určete výkonovou účinnost laseru pro vybranou hodnotu proudu v nadprahové oblasti.

Teória

Polovodičový laser pracuje na podobnom princípe ako normálny laser, ktorého činnosť je popísaná v [1]. Energia sa polovodičovému laseru dodáva priloženým elektrickým prúdom, ktorý tečie P-N priedchodom v priepustnom smere. Aby laser fungoval, musíme zabezpečiť inverziu populácie hladín a kladnú spätnú väzbu. Inverzia sa dosahuje napr. silne legovanými polovodičovými prvkami. Kladná spätná väzba sa realizuje tak, že predná a zadná stena kryštálu sa vybrúsi kolmo na P-N priedchod a tým vznikne Fabry-Perotov rezonátor, ktorý zosilňuje stimulovanú emisiu.

Pri nízkych hodnotách prúdu v polovodiči vzniká len spontánna emisia a laser pracuje ako obyčajná LED dióda, vyžarované spektrum je pomerne široké. Pri zvyšovaní prúdu sa dosiahne prahový prúd i_0 , nad ktorým už vzniká stimulovaná emisia. Vyžarované spektrum sa zúži a primárne vyžaruje na vlnovej dĺžke, ktorá zodpovedá maximu intenzity spontánnej emisie. Tento prechod sa prejaví na závislosti vyžarovaného svetelného toku Φ_e na prechádzajúcom prúde. Smernica závislosti sa prudko zvýši od prahovej hodnoty i_0 . Prúd i_0 teda môžeme určiť extrapoláciou z oblasti spontánnej emisie, ako priesečník s osou.

Dôležitým parametrom laserovej diódy je výkonová účinnosť [1]

$$\eta = \frac{\Phi_e}{P}, \quad (1)$$

kde $P = Ui$ je príkon laserovej diódy.

Výsledky merania

Chyba σ_s pre veličinu vypočítanú z n iných veličín x_i bola určená pomocou vzťahu pre prenos chýb [2]

$$\sigma_s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (2)$$

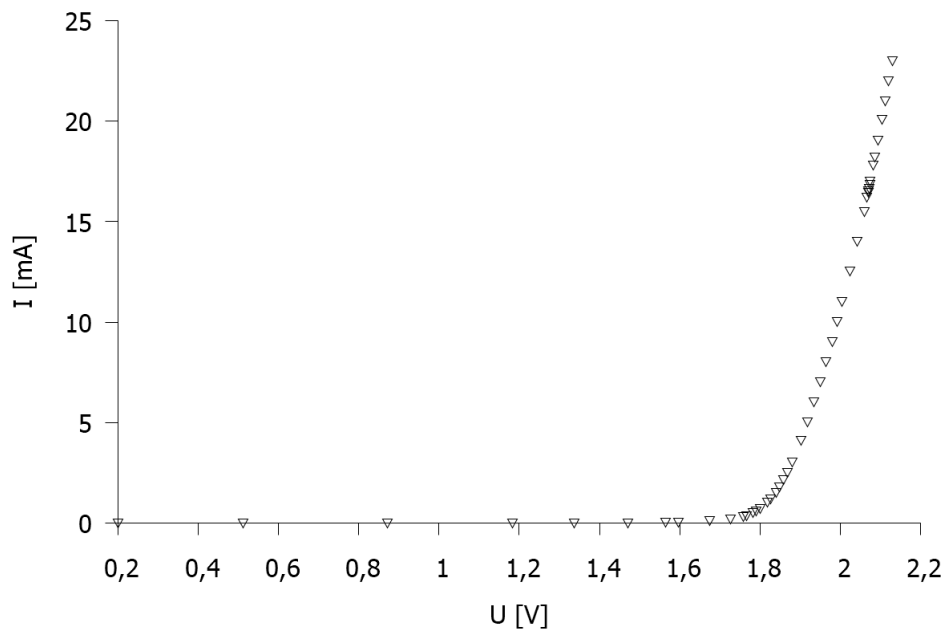
Pri meraní V-A a svetelnej charakteristiky sme použili voltmeter UNI-T UT803, ampérmeter RFT G-1002.500 a galvanometer. Namerané hodnoty V-A a svetelnej charakteristiky sú uvedené v tabuľke 1. Grafické znázornenie je na obrázkoch 1 a 2.

Z grafu svetelného toku sme lineárnou regresiou určili prahový prúd

$$i_0 = (16,30 \pm 0,40) \text{ mA}$$

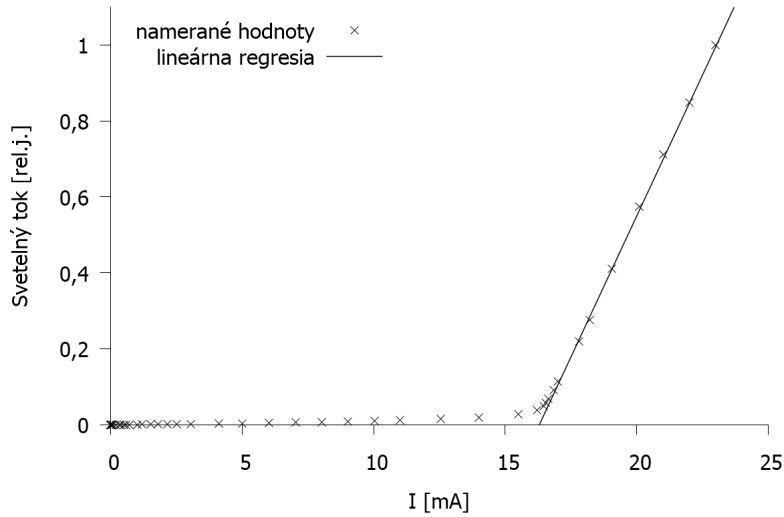
U [V]	I [mA]	Φ_e [r.j]	U [V]	I [mA]	Φ_e [r.j]
0,200±0,003	0,0000±0,0003	0	1,919±0,008	5,010±0,050	0,0040
0,512±0,004	0,0000±0,0003	0	1,935±0,008	6,010±0,054	0,0051
0,871±0,005	0,0000±0,0003	0	1,951±0,008	7,030±0,058	0,0062
1,183±0,006	0,0000±0,0003	0	1,965±0,008	8,020±0,062	0,0074
1,337±0,006	0,0005±0,0003	0	1,980±0,008	9,030±0,066	0,0086
1,471±0,006	0,0052±0,0003	0	1,993±0,008	10,040±0,070	0,010
1,564±0,007	0,0250±0,0004	0	2,005±0,008	11,000±0,074	0,011
1,596±0,007	0,0390±0,0005	0	2,025±0,008	12,550±0,080	0,015
1,674±0,007	0,1020±0,0007	0	2,042±0,008	14,010±0,086	0,019
1,726±0,007	0,1952±0,0011	0	2,060±0,008	15,510±0,092	0,027
1,759±0,007	0,3250±0,0043	0	2,067±0,008	16,220±0,095	0,038
1,766±0,007	0,3700±0,0045	0,0001	2,070±0,008	16,460±0,096	0,049
1,782±0,007	0,4970±0,0050	0,0003	2,070±0,008	16,550±0,096	0,058
1,790±0,007	0,5840±0,0053	0,0003	2,072±0,008	16,650±0,097	0,068
1,800±0,007	0,7100±0,0058	0,0004	2,074±0,008	16,840±0,097	0,090
1,819±0,007	1,0150±0,0071	0,0005	2,075±0,008	17,010±0,098	0,11
1,827±0,007	1,2010±0,0078	0,0007	2,083±0,008	17,82±0,10	0,22
1,841±0,008	1,5310±0,0091	0,0010	2,086±0,008	18,21±0,10	0,28
1,849±0,008	1,810±0,010	0,0011	2,094±0,008	19,05±0,11	0,41
1,859±0,008	2,170±0,039	0,0014	2,104±0,008	20,10±0,38	0,58
1,868±0,008	2,510±0,040	0,0016	2,112±0,008	21,00±0,38	0,71
1,881±0,008	3,040±0,042	0,0022	2,121±0,008	22,00±0,39	0,85
1,903±0,008	4,110±0,046	0,0032	2,130±0,008	23,00±0,39	1,00

Tabuľka 1: Namerané hodnoty V-A a svetelnej charakteristiky



Obr. 1: V-A charakteristika laseru

Ďalej sme museli nakalibrovať stupnicu monochromátora. Monochromátor je zariadenie, ktoré z širokého spektra svetelného zdroja pomocou disperzného prvku vyselektuje len úzky rozsah vlnových dĺžok, ktorý môžeme otáčaním disperzného prvku meniť. Ako detektor na výstupe bol použitý fotonásobič. Dáta boli získavané pomocou počítača. Našou úlohou bolo priradiť vlnovej dĺžke, ktorá vystupuje z monochromátora, dielik stupnice na monochromátore. Predpokladali sme lineárnu závislosť $\lambda = \alpha d + \beta$, kde d sú dieliky monochromátora. Potom by sme mohli závislosť extrapolovať na ostatné neznáme vlnové dĺžky. Na kalibrovanie sme použili spektrálne čiary ortufovej výbojky. Čiary a príslušné dieliky monochromátora sú uvedené v tabuľke 2. Grafické znázornenie je na obrázku 3. Šírku výstupnej štrbiny sme

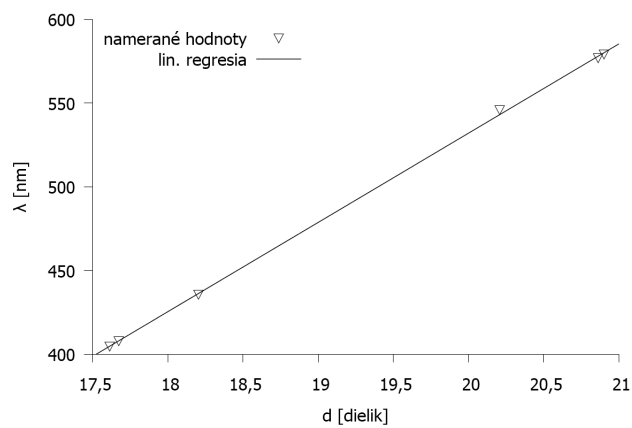


Obr. 2: Svetelná charakteristika laseru

volili $30\mu\text{m}$. Táto šírka bola ešte dostatočná na to aby prechádzala dostatočnou intenzitou a zároveň aby výstupné spektrum bolo dostatočne úzke a maximá čiar ostré a teda mohli sme pohodlne určiť vlnovú dĺžku.

λ [nm]	dielik stupnice
404,7	17,6139
407,8	17,6731
435,8	18,2027
546,1	20,2085
577,0	20,8626
579,1	20,9022

Tabuľka 2: Dieliky monochromátora príslušiace spektrálnym čiarom ortuťovej výbojky



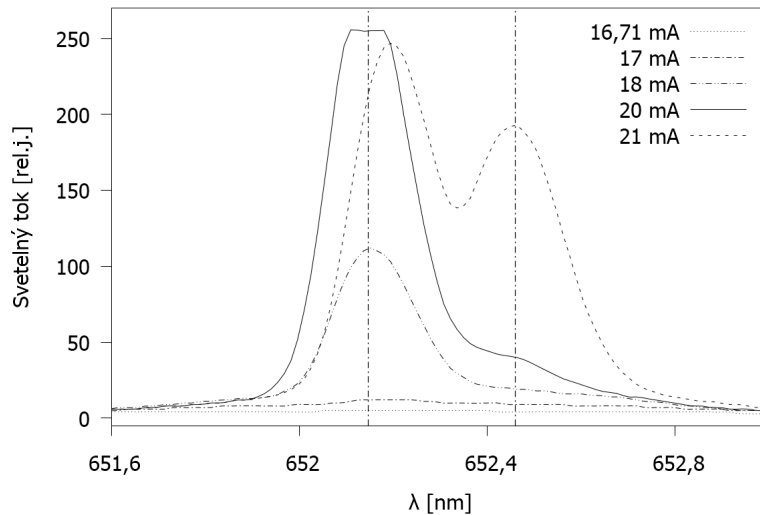
Obr. 3: Kalibrácia monochromátora

Z lineárnej regresie nám vyšli koeficienty

$$\alpha = (53,34 \pm 0,47) \text{ nm.dielik}^{-1}$$

$$\beta = (-534,804 \pm 9,055) \text{ nm}$$

Následne sme zvolili pár hodnôt nad a pod prahovým prúdom a zmerali sme emisné spektrum laseru. Emisné spektrum je znázornené na obrázku 4. Z grafu sme určili hodnoty vlnových dĺžok s maximálnou intenzitou. V okolí prahového prúdu je intenzita ešte veľmi nízka. Najvyššiu intenzitu pre prúdy 18 a 20 mA sme určili $\lambda_{max}^1 = 652,15$ nm. Toto maximum sa pri prúde 21 mA mierne posunulo a objavilo sa aj nové maximum $\lambda_{max}^2 = 652,46$ nm. Toto je pravdepodobne spôsobené zahriatím P-N prechodu. Pri prúde $I=20$ mA je vidieť, že maximum intenzity je odrezané, čo je spôsobené presiahnutím rozsahu detektora intenzity.



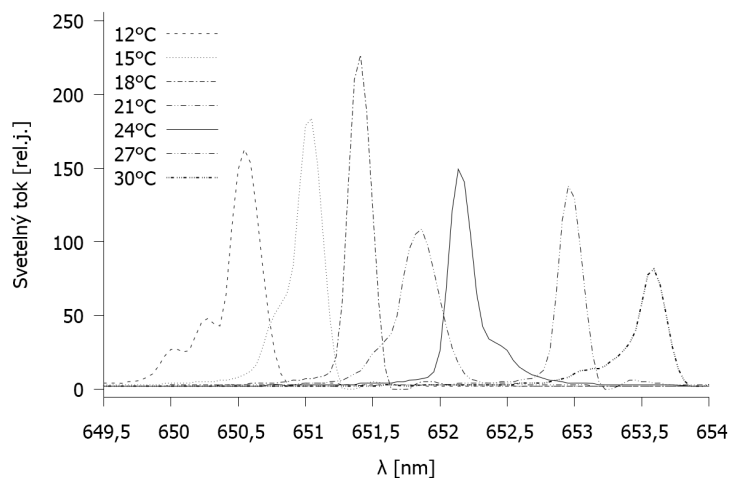
Obr. 4: Emisné spektrum laserovej diódy pre vybrané prúdy

Na meranie teplotnej závislosti sme si vybrali prúd $I=20$ mA. Teplotu sme menili pomocou Peltierovho článku. Emisné spektrum v závislosti na teplote je na obrázku 5. Meranie je zaťažené určitou chybou pretože rozlíšenie teplomera bolo 1°C a teplota sa aj v priebehu merania menila. Ďalej na obrázku 6 je závislosť vlnovej dĺžky na teplote. Graf sme preložili lineárnou funkciou, ktorej koeficienty vyšli

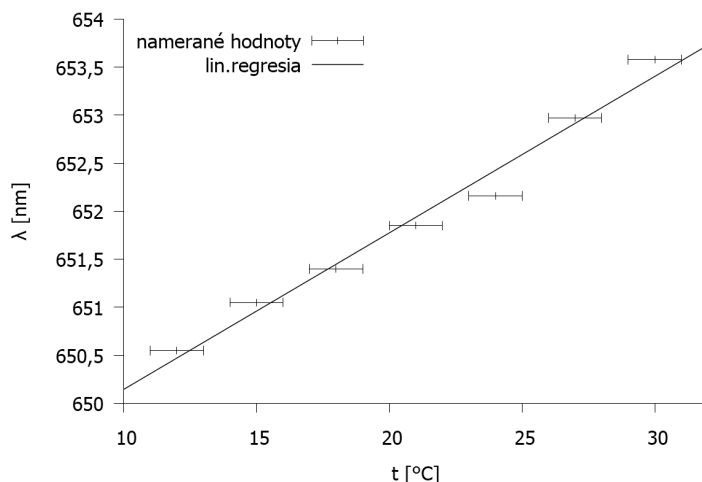
$$\alpha = (0,163 \pm 0,010) \text{ nm} \cdot (\text{C}^\circ)^{-1}$$

$$\beta = (648,52 \pm 0,22) \text{ nm}$$

Či sa naozaj jedná o lineárnu závislosť nevieme kvôli nepresnosti v teplote a nízkemu rozsahu nameraných teplôt. Tomu aj zodpovedá relatívna odchýlka smernice, cez 6%.



Obr. 5: Teplotná závislosť emisného spektra pre prúd laserom $I=20$ mA



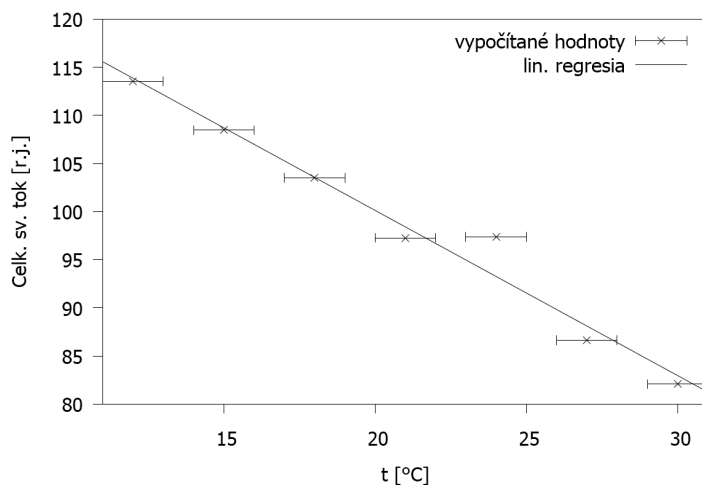
Obr. 6: Teplotná závislosť vln. dĺžky pre prúd laserom I=20 mA

Na obrázku 7 je zobrazený celkový vyžiarený tok laserovou diódou v závislosti na teplote, ktorý sme vypočítali integráciou svetelného toku cez interval spektra na obrázku 5. Graf sme taktiež preložili lin. závislosťou s koeficientami

$$\alpha = (-1,72 \pm 0,13) \text{ r.j.} (\text{°C})^{-1}$$

$$\beta = (134,5 \pm 2,8) \text{ r.j.}$$

O tejto závislosti z podobných dôvodov ako u závislosti vlnovej dĺžky nemôžeme povedať či je naozaj lineárna.



Obr. 7: Teplotná závislosť celkového svetelného toku pre prúd laserom I=20 mA

Z priloženého datasheetu v praktiku sme zistili, že ak detekčnou fotodiódou preteká prúd $I_g \approx 0,3 \text{ mA}$, zodpovedá to vyžiarenému výkonu laseru $P_v = 10 \text{ mW}$. Prúd fotodiódy sme vlastne merali na galvanometri. Predpokladajme, že platí vzťah medzi výkonom a prúdom detekovanom na galvanometri

$$P_v = kI_g, \tag{3}$$

kde k je konštanta. Vyžiarený výkon stotožňujeme s vyžiareným svetelným tokom. Z vyššie uvedených hodnôt teda môžeme určiť jej hodnotu na $k \approx 33,3V$. Následne môžeme vypočítať podľa vzťahu (1) výkonovú účinnosť pre prúd laserom $i = 21 \text{ mA}$, napätie na laseri $U = 2,112 \text{ V}$ a prúd na galvanometri $I_g = 0,13 \text{ mA}$

$$\eta \approx 9,8\%.$$

Diskusia

V-A a svetelná charakteristika má očakávaný priebeh. Pri určovaní prahového prúdu i_0 lin. regresiou, funkcia relatívne dobre sedí na namerané dáta ale úlohu pri nepresnosti hrá aj odchýlka galvanometra, hlavne ampérmetra. Pri posledných štyroch hodnotách bol rozsah ampérmetra 200 mA a chyba bola $\approx 1,8\%$. Preto aj odchýlka prahového prúdu činí $\approx 2,5\%$.

Voľba úzkej štrbiny monochromátora už bola diskutovaná vo výsledkoch merania. Pri kalibrácii monochromátora neuvádzam chybu dielikov, pretože maximum intenzity bolo vďaka úzkej štrbine ostré a rozlišovacia schopnosť počítača bola vysoká a teda chyba zanedbateľná. V systéme sa však mohla vyskytnúť systematická chyba, ktorá mohla vzniknúť niekde vnútri monochromátora.

Pri meraní emisného spektra laseru sme zistili, že v okolí prahového prúdu je intenzita vyžarovania veľmi malá, do 20 mA sa javí, že maximálna intenzita zodpovedá jednej vln. dĺžke. Pri prúde 21 mA vidíme na obr. 4 dve maximá. K dispozícii máme málo údajov, preto nedokážeme určiť čím by mohol byť tento jav spôsobený. Jednou z možností je, že P-N priechod sa zvýšením prúdu zahrieva a tým sa znižuje energia potrebná na prekonanie zakázaného pásu. Na obr. 6 je vidieť, že vlnová dĺžka sa so zvyšujúcou teplotou zvyšuje približne lineárne. Podobne je to aj s celkovým vyžiareným výkonom. Ten sa so zvyšujúcou teplotou zhruba lineárne znižuje. Najvyšší výkon teda laser podáva pri nižších teplotách ale za cenu širšieho spektra. Najostrejšie maximum intenzity a najdiskrétnejšie spektrum má laser pri 18°C.

Určenie výkonovej účinnosti je len približné, pretože výrobca uvádza veľký rozptyl detekčných prúdov fotodiódy pre referenčný výstupný výkon $P_o = 10$ mW. My sme určili účinnosť pre typickú hodnotu detekčného prúdu.

Záver

V-A a svetelná charakteristika mali očakávaný priebeh. Zo svetelnej charakteristiky sme určili prahový prúd

$$i_0 = (16,30 \pm 0,40) \text{ mA}$$

Ortuťovou výbojkou sme okalibrovali stupnicu monochromátora. Z emisného spektra sme určili vlnovú dĺžku maximálnej intenzity pre rôzne prúdy $\lambda_{max}^1 = 652,15$ nm a $\lambda_{max}^2 = 652,46$ nm.

Zistili sme, že s rastúcou teplotou cca lineárne rastie vlnová dĺžka a lineárne klesá celkový výkon laserovej diódy. Všetky závislosti sme graficky spracovali.

Určili sme typickú výkonovú účinnosť lasera pre prúd $i = 21$ mA

$$\eta \approx 9,8\%.$$

Literatúra

- [1] PELANT, I. *Fyzikální praktikum III - Optika*. 3 vyd. přepr. a dopl. Praha: Matfyzpress. 2005. str. 113-121
- [2] J. English. *Úvod do praktické fyziky I: Spracování výsledků měření*. 1. vyd. Praha: Matfyzpress. 2006