

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

Praktikum 3

Úloha č. 15

Název: Studium polovodičového GaAs/GaAlAs laseru

Pracoval: Mária Šoltéssová stud.sk.: F-14 dne: 2.5.2006

Odevzdal dne:

Hodnocení:

Připomínky:

kapitola referátu	možný počet bodů	udělený počet bodů
Teoretická část	0 - 3	
Výsledky měření	0 - 10	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 2	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:.....

dne:

Pracovná úloha:

1. Zmerajte súčasne svetelnú aj voltampérovú charakteristiku polovodičového laseru. Namerané hodnoty závislosti spracujte graficky. Stanovte prahový prúd i_0 .
2. Pomocou Hg výbojky okalibrujte stupnicu monochromátoru.
3. Zmerajte emisné spektrum polovodičového laseru pri niekoľkých hodnotách prúdu laserom pod a nad odhadnutou prahovou hodnotou i_0 . Určte vlnovú dĺžku stimulovanej emisie a kvalitatívne diskutujte zmeny v spektrách sprevádzajúce zmenu napájacieho prúdu.
4. Z módovej štruktúry emisného spektra laseru určte dĺžku aktívnej oblasti rezonátoru. Diskutujte, prečo je volená veľmi úzka štrbina monochromátoru.
5. Určte výkonovú účinnosť laseru pre vybranú hodnotu prúdu v nadprahovej oblasti.

Teoretická časť:

Polovodičový injekčný laser (laserová dióda) je čerpaný elektrickým prúdom prechádzajúcim $P - N$ prechodom v priepustnom smere. Pri nízkych hodnotách prechádzajúceho prúdu vzniká iba spontánna emisia, laser pracuje ako elektroluminiscenčná dióda. Pri zvyšovaní hodnoty prúdu sa zvyšuje koeficient zisku g a ak prekročí prúd určitú kritickú hodnotu i_0 (prahový prúd), prevýši zisk g straty α a dôjde k stimulovanej emisii, dióda začína pracovať ako laser. Po prekročení prahového prúdu sa spektrum emitovaného žiarenia zúži, pretože najviac je zosilňované žiarenie s vlnovou dĺžkou maxima intenzity spontánnej emisie. Prekročenie prahového prúdu sa prejaví aj na svetelnej charakteristike, v okolí i_0 sa smernica tejto závislosti prudko zvýši ([1] obr. 7.2 – 1).

Usporiadanie experimentu na meranie voltampérovej a svetelnej charakteristiky a emisného spektra je popísané podrobne v [1]. Svetlo z laserovej diódy dopadá na vstupnú štrbinu monochromátora. V monochromátore sa pomocou mriežky žiarenie spektrálne rozloží a po priechode výstupnou štrbinou dopadá na do fotonásobiča. Signál z fotonásobiča spracováva počítač, otáčanie mriežky je tiež riadené počítačom.

Medzi dôležité parametre laserovej diódy patrí jej výkonová účinnosť η definovaná ako

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

kde $P = Ui$ je elektrický príkon laserovej diódy.

Medzi odrazovými plochami, ktoré tvoria Fabry-Perotov rezonátor s dĺžkou L , vzniká stojaté elektromagnetické vlnenie musí platiť

$$m \frac{\lambda_p}{2} = L \Rightarrow 2Lk_m = m2\pi, \quad (2)$$

kde m je celé číslo charakterizujúce vlnový mód, k_m príslušný vlnový vektor a λ_p značí vlnovú dĺžku svetla v polovodiči. Dostávame preto podľa (2) diskkrétne laserové spektrum. Použitím vzťahov $\Delta k = k_{m+1} - k_m = \frac{\pi}{L}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ a $v_g = \frac{\Delta \omega}{\Delta k} = \frac{c}{N_g}$, kde N_g

je grupový index aktívnej časti laseru, dostaneme

$$\Delta I = \frac{I^2}{2LN_g}. \quad (3)$$

Dĺžku laserového rezonátoru potom určíme ako

$$L = \frac{I^2}{2\Delta I N_g}. \quad (4)$$

Výsledky meraní:

Najprv sme zmerali voltampérovú a svetelnú charakteristiku laseru. Napätie sme merali digitálnym voltmetrom na rozsahu 2V a prúd sme merali na digitálnom ampérmetri na rozsahoch 2 mA, 20 mA a 200 mA. Chybu merania odhadujeme v ráde poslednej zobrazovanej cifry pre obidva prístroje. Galvanometrom sme merali prúd tečúci fotodiódou I_ϕ , zo zadanej kalibrácie (prúdu laserovou diódou 115 mA zodpovedá svetelný tok 0,5 mW) sme určili svetelný tok Φ_e vyžarovaný laserom za predpokladu priamej úmernosti I_ϕ a Φ_e . Chybu merania galvanometrom uvažujeme polovicu najmenšieho dielika. Chybu určenia svetelného toku Φ_e určíme z chyby galvanometru.

Namerané hodnoty sú uvedené v tabuľke 1, prúd I_ϕ je udávaný v dielikoch stupnice galvanometru, chyba merania napätia je 0,001 V, chyba merania prúdu je podľa použitého rozsahu 0,001 mA, 0,01 mA a 0,1 mA. Voltampérová charakteristika je vynesená v grafe 1, svetelná charakteristika v grafe 2.

Pre hodnotu prúdu $i = 114,0$ mA sme určili svetelný tok vyžarovaný laserovou diódou ako $\Phi_e = (0,48 \pm 0,01)$ mW. Príkon laserovej diódy sme určili ako súčin napätia a prúdu ako $P = (216,1 \pm 0,2)$ mW, chyba je určená prenesením chýb prúdu a napätia. Výkonová účinnosť laseru η určená podľa vzťahu (1) je potom

$$h = (0,220 \pm 0,005)\%$$

chyba η je určená prenesením chýb P a Φ_e .

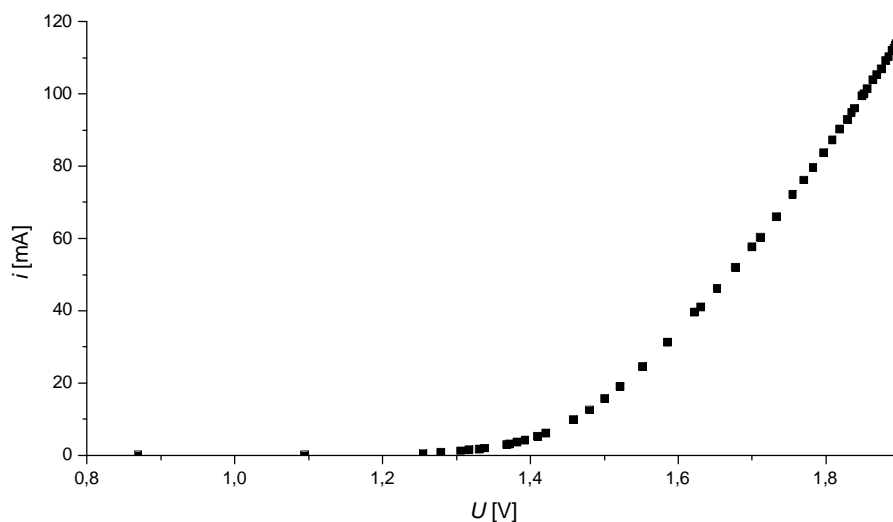
Ak preložíme časť svetelnej charakteristiky lineárnou závislosťou $\Phi_e = A + Bi$, prahový prúd i_0 určíme ako jej priesečník s vodorovnou osou $i_0 = -\frac{A}{B}$.

Preložením priamky hodnotami $i > 111$ mA sme získali prahový prúd ako

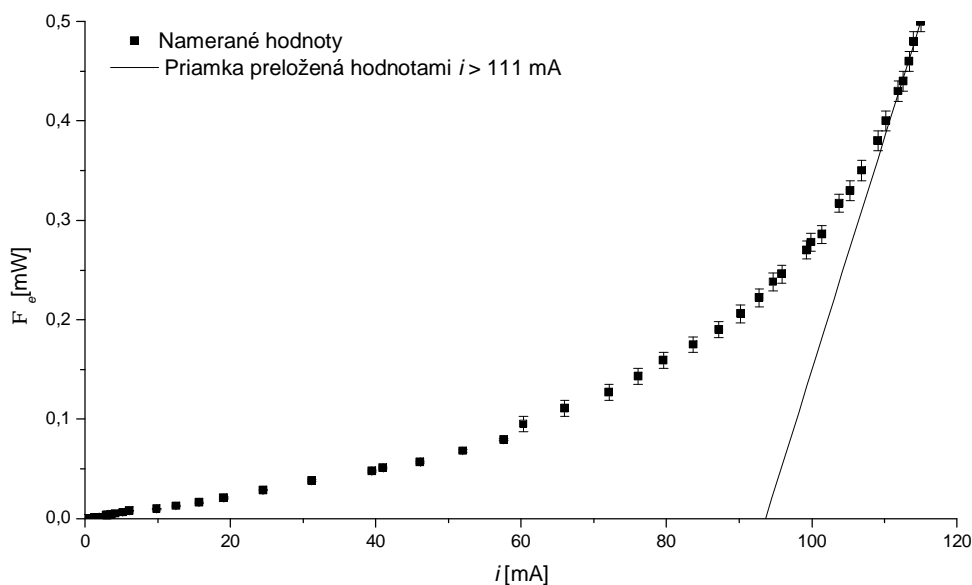
$$i_0 = (94 \pm 10) \text{ mA},$$

chyba je určená z chyby lineárnej regresie spojenej s chybou Φ_e .

Graf 1: Voltampérová charakteristika laserovej diódy



Graf 2: Svetelná charakteristika laserovej diódy



Tabuľka 1: Namerané hodnoty voltampérovej a svetelnej charakteristiky

U [V]	i [mA]	I_ϕ	Φ_e [mW]	U [V]	i [mA]	I_ϕ	Φ_e [mW]
0,869	0,001	$1 \pm 0,5$	$0,0002 \pm 0,0001$	1,711	60,3	600 ± 50	$0,095 \pm 0,008$
1,095	0,045	$1 \pm 0,5$	$0,0002 \pm 0,0001$	1,733	66,0	700 ± 50	$0,111 \pm 0,008$
1,255	0,604	$1 \pm 0,5$	$0,0002 \pm 0,0001$	1,755	72,1	800 ± 50	$0,127 \pm 0,008$
1,279	0,841	$2 \pm 0,5$	$0,0003 \pm 0,0001$	1,770	76,1	900 ± 50	$0,143 \pm 0,008$
1,306	1,219	$4 \pm 0,5$	$0,0006 \pm 0,0001$	1,783	79,6	1000 ± 50	$0,159 \pm 0,008$
1,317	1,426	$5 \pm 0,5$	$0,0008 \pm 0,0001$	1,797	83,7	1100 ± 50	$0,175 \pm 0,008$
1,331	1,723	$7 \pm 0,5$	$0,0011 \pm 0,0001$	1,809	87,2	1200 ± 50	$0,190 \pm 0,008$
1,338	1,893	$9 \pm 0,5$	$0,0014 \pm 0,0001$	1,819	90,2	1300 ± 50	$0,206 \pm 0,009$
1,368	2,89	$19 \pm 0,5$	$0,0030 \pm 0,0001$	1,829	92,8	1400 ± 50	$0,222 \pm 0,009$
1,372	3,07	$21 \pm 0,5$	$0,0033 \pm 0,0001$	1,835	94,7	1500 ± 50	$0,238 \pm 0,009$
1,382	3,53	$25 \pm 0,5$	$0,0040 \pm 0,0001$	1,839	95,9	1550 ± 50	$0,246 \pm 0,009$
1,393	4,12	$30 \pm 0,5$	$0,0048 \pm 0,0001$	1,849	99,3	1700 ± 50	$0,270 \pm 0,009$
1,410	5,23	$40 \pm 0,5$	$0,0063 \pm 0,0001$	1,852	99,9	1750 ± 50	$0,278 \pm 0,009$
1,421	6,10	$49 \pm 0,5$	$0,0078 \pm 0,0001$	1,856	101,4	1800 ± 50	$0,286 \pm 0,009$
1,458	9,83	60 ± 5	$0,0095 \pm 0,0008$	1,864	103,8	2000 ± 50	$0,317 \pm 0,009$
1,480	12,53	80 ± 5	$0,0127 \pm 0,0008$	1,869	105,3	2100 ± 50	$0,33 \pm 0,01$
1,501	15,67	100 ± 5	$0,0159 \pm 0,0008$	1,875	106,9	2200 ± 50	$0,35 \pm 0,01$
1,522	19,07	130 ± 5	$0,0206 \pm 0,0009$	1,881	109,1	2400 ± 50	$0,38 \pm 0,01$
1,552	24,5	180 ± 5	$0,0286 \pm 0,0009$	1,885	110,2	2500 ± 50	$0,40 \pm 0,01$
1,586	31,2	240 ± 5	$0,038 \pm 0,001$	1,890	111,9	2700 ± 50	$0,43 \pm 0,01$
1,622	39,5	300 ± 5	$0,048 \pm 0,001$	1,892	112,6	2800 ± 50	$0,44 \pm 0,01$
1,631	41,0	320 ± 5	$0,051 \pm 0,001$	1,894	113,4	2900 ± 50	$0,46 \pm 0,01$
1,653	46,1	360 ± 5	$0,057 \pm 0,001$	1,896	114,0	3000 ± 50	$0,48 \pm 0,01$
1,678	52,0	430 ± 5	$0,068 \pm 0,001$	1,899	115,0	3150 ± 50	$0,50 \pm 0,01$
1,700	57,6	500 ± 5	$0,079 \pm 0,001$				

Potom sme podľa pokynov počítačového programu okalibrovali stupnicu monochromátoru pomocou známeho spektra ortuťovej výbojky. Z tabuľkových hodnôt spektrálnych čiar ortuťovej výbojky (z [2]) potom môžeme určiť, akej vlnovej dĺžke zodpovedajú dieliky na stupnici monochromátoru. Vlnové dĺžky spektrálnych

čiar a ich polohy na stupnici sú uvedené v tabuľke 2. Spektrum ortuťovej výbojky je znázornené v grafe 3.

Lineárnou regresiou sme určili koeficienty prevodného vzťahu medzi dielikmi stupnice monochromátoru a vlnovou dĺžkou

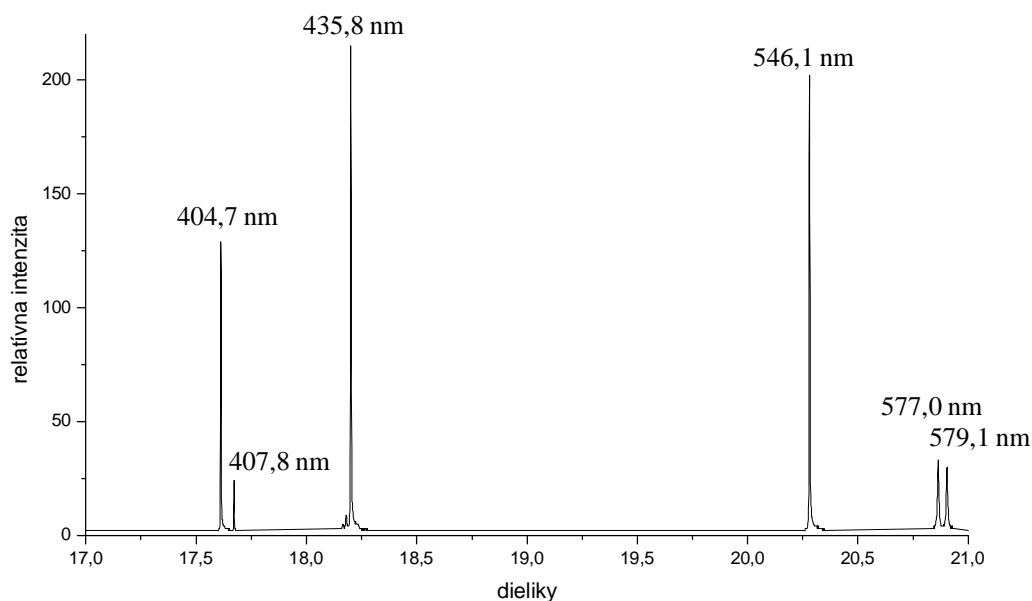
$$\lambda \text{ [nm]} = A + B \cdot \text{dielik},$$

kde $A = (-528,8 \pm 0,3) \text{ nm}$ a $B = (53,00 \pm 0,02) \text{ nm}$, chyba koeficientov je určená z chyby lineárnej regresie.

Tabuľka 2: Vlnové dĺžky spektrálnych čiar a ich polohy na stupnici

dieliky	λ [nm]
17,611	404,7
17,671	407,8
18,201	435,8
20,280	546,1
20,863	577,0
20,903	579,1

Graf 3: Spektrum ortuťovej výbojky

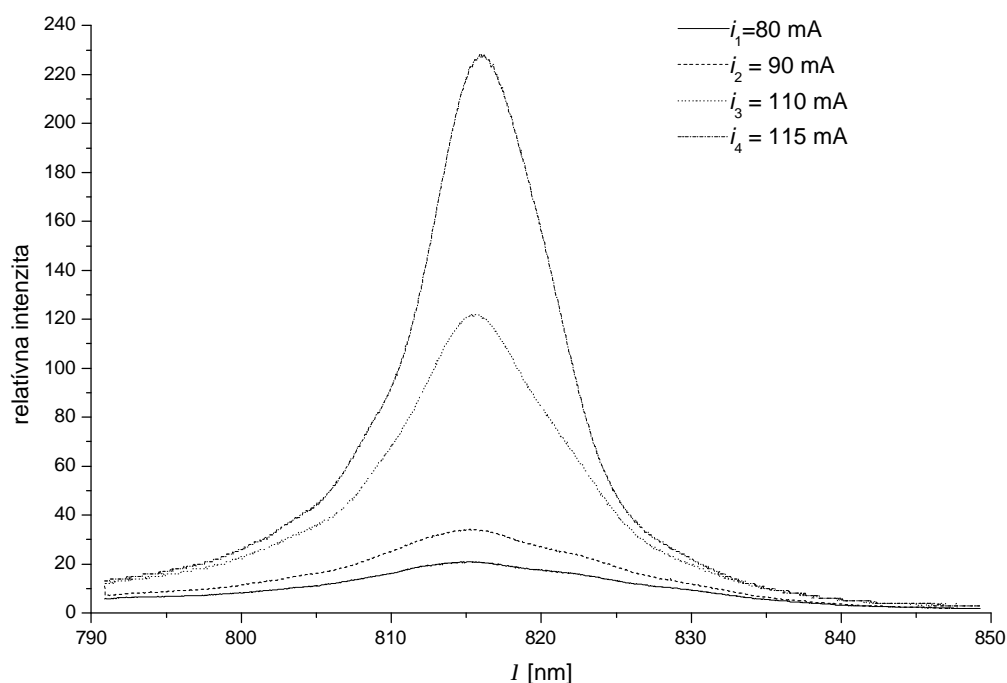


Merali sme emisné spektrum lasera pre štyri rôzne hodnoty prúdu v okolí prahového prúdu i_0 : $i_1 = 80 \text{ mA}$, $i_2 = 90 \text{ mA}$, $i_3 = 110 \text{ mA}$, $i_4 = 115 \text{ mA}$, pre prúd i_1 sme použili zosilnenie 10x, pre prúd i_2 5x. Merania sme robili pri šírke štrbiny 0,4 mm. Vlnovú dĺžku stimulovanej emisie sme určili z maxima spektra nameraného pre prúd i_4 ako

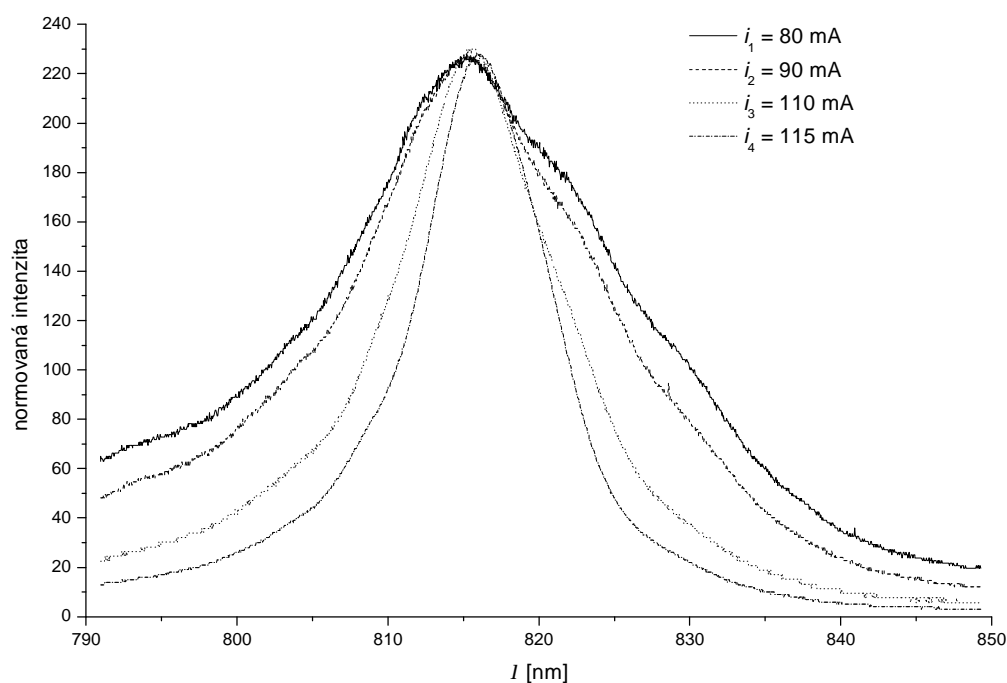
$$I_{\text{max}} = (816 \pm 2) \text{ nm}.$$

Namerané charakteristiky sú vynesené v grafe 4, v grafe 5 sú vynesené charakteristiky normované na rovnakú intenzitu v maxime.

Graf 4: Emisné spektrá laseru pre rôzne hodnoty prúdu



Graf 5: Emisné spektrá laseru normované na rovnakú intenzitu v maxime



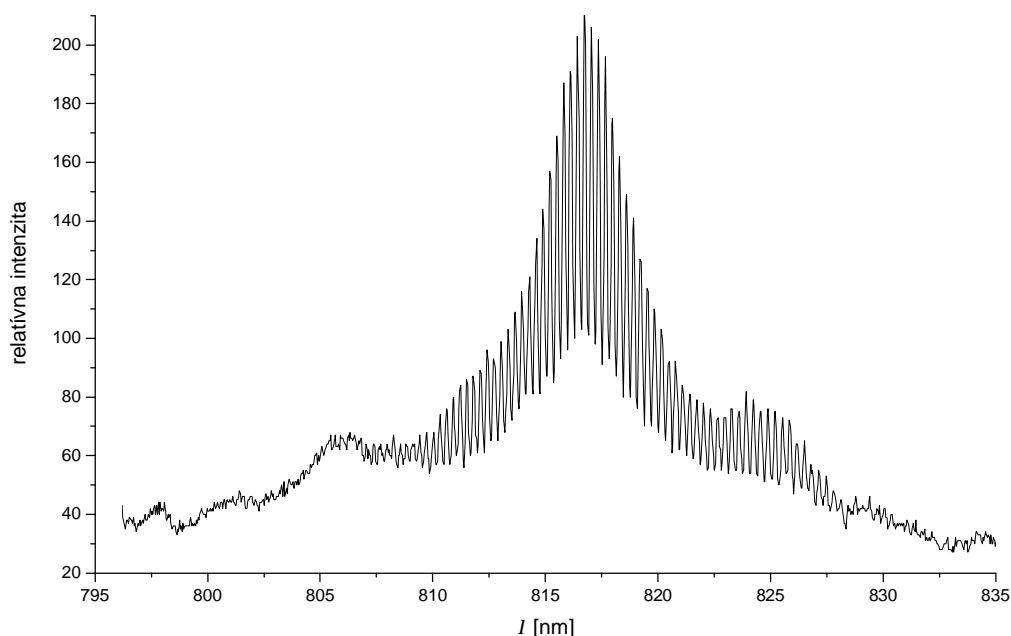
Módovú štruktúru emisného spektra laseru sme merali pri prechádzajúcom prúde $i = 110$ mA a šírke štrbiny 0,05 mm. Namerané spektrum je vynesené v grafe 6. Vzďialenosť dvoch susedných módov $\Delta\lambda$ sme určili z časti spektra v okolí maxima (táto časť spektra je zobrazená v grafe 7) v intervale vlnových dĺžok $(8,0 \pm 0,1)$ nm (chyba je odhadnutá na základe toho, kde začína prvý a posledný mód na tomto intervale). Na tomto intervale sme napočítali 26 módov, priemerná vzdialenosť

módov je teda $\Delta l = (308 \pm 4)$ pm. Ako vlnovú dĺžku λ berieme λ_{max} , hodnotu grupového indexu lomu sme použili $N_g = 4,5$ z [1]. Podľa vzťahu (4) je potom dĺžka laserového rezonátoru

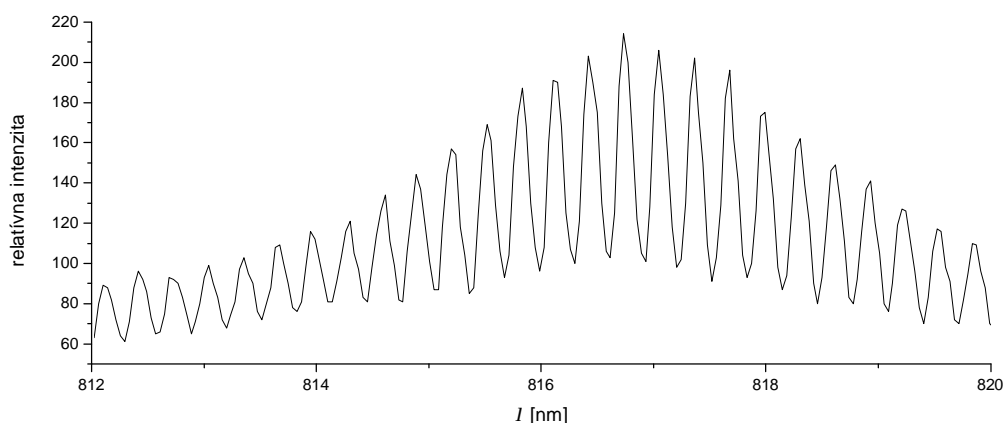
$$L = (240 \pm 3) \mu\text{m}.$$

Chyba je určená prenesením chýb veličín zo vzťahu (4).

Graf 6: Módová štruktúra laserového spektra



Graf 7: Módová štruktúra laserového spektra – okolie maxima



Diskusia:

Pri meraní voltampérovej a svetlenej charakteristiky sme na meranie prúdu a napätia používali digitálne prístroje, chybu odhadujeme v ráde poslednej zobrazovanej cifry. Napätie sme merali na rozsahu 2 V, čomu zodpovedá chyba 0,001 V. Prúd sme merali na rozsahoch 2 mA, 20 mA a 200 mA, čomu zodpovedajú chyby 0,001 mA, 0,01 mA

a 0,1 mA. Svetelný tok sme merali galvanometrom v relatívnych jednotkách ako prúd tečúci detegujúcou fotodiódou. Chybu merania odhadujeme na 0,5 dielika galvanometru, pre použité rozsahy 1:1, 1:10, 1:100 to zodpovedá chybe 0,5, 5 a 50 dielikov.

Z grafu svetelnej charakteristiky nie je dobre vidieť ostrú zmenu smernice pri prechode nad prahový prúd. Okrem toho sme merali prúd len do 115 mA, priamku sme teda prekladali cez málo bodov. Určenie prahového prúdu je preto zaťažené pomerne veľkou chybou. Väčšia presnosť by sa dala dosiahnuť nameraním viacerých hodnôt aj pre vyššie prúdy. Prahový prúd sme určili ako $i_0 = (94 \pm 10)$ mA, čo potvrdili vyžarovacie charakteristiky.

Emisné spektrá laseru pre rôzne hodnoty prúdov súhlasia s teoretickými predpokladmi. Z grafu 5 vidíme, že pre podprahové prúdy (80 mA a 90 mA) je maximum neostré a intenzity sú nižšie. Pre nadprahové prúdy (110 mA a 115 mA) sa spektrum zúži a maximum charakteristiky je ostré. Graf 6 umožňuje porovnať šírku spektier pre jednotlivé prúdy. Pre vyššie hodnoty prúdov je spektrum užšie, čo je v súlade s predpokladmi.

Pri nastavení užšej výstupnej štrbiny monochromátora sme mohli výraznejšie pozorovať moduláciu laserového spektra. Šírka štrbiny monochromátora určuje, aký rozsah vlnových dĺžok sa prejaví na danom bode spektrálnej charakteristiky. Aby sme mohli rozlíšiť módovú štruktúru, musí byť v jednom bode rozsah vlnových dĺžok menší ako vzdialenosť módov, preto treba zvoliť užšiu štrbinu.

Dĺžku rezonátora sme určili podľa vzťahu (4). Vzdialenosť jednotlivých módov nie je konštantná pre celé spektrum, predpokladáme však, že modulácia sa najviac prejaví v maxime charakteristiky. Preto sme do vzťahu (4) dosadili vlnovú dĺžku v maxime λ_{max} a šírku módov $\Delta\lambda$ sme určovali na okolí maxima.

Záver:

Zmerali sme voltampérovú a svetelnú charakteristiku (graf 1 a 2) laserovej diódy a určili sme zo svetelnej charakteristiky prahový prúd ako

$$i_0 = (94 \pm 10) \text{ mA.}$$

Výkonovú účinnosť laseru sme určili pre prúd 114,0 mA ako

$$h = (0,220 \pm 0,005) \%.$$

Zmerali sme emisné spektrá laseru pre niekoľko hodnôt prúdu nad a pod prahovým prúdom (grafy 4 a 5). Určili sme vlnovú dĺžku stimulovanej emisie ako

$$I_{max} = (816 \pm 2) \text{ nm.}$$

Namerali sme módovú štruktúru emisného spektra (graf 6) a určili sme dĺžku aktívnej oblasti rezonátora ako

$$L = (240 \pm 3) \mu\text{m.}$$

Literatúra:

[1] Študijný text k úlohe č. 15, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp>

[2] J. Brož, V. Roskovec, M. Valouch: Fyzikální a matematické tabulky, SNTL, Praha 1980