Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM III

Úloha č.: 15

Název: Štúdium polovodičového GaAs/GaAlAs lasera

Vypracoval: Viktor Babjak.....stud. sk. F 11 ..... dne: 20. 04. 2006

Odevzdal dne: .....

Hodnocení:

Připomínky:

žiadne **J**

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

Posuzoval:…… dne:……

Pracovné úlohy:

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

Teoretická časť:

Polovodičový laser

Polovodičový laser je čerpaný elektrickým prúdom prechádzajúcim P – N prechodom v priepustnom smere, viď [1]. Keď laserom preteká prúd nižší ako prahový prúd i_0, tak v oblasti prechodu vzniká iba spontánna emisia, t.j. laser pri takomto prúde pracuje ako obyčajná elektroluminiscenčná dióda – spektrum lasera je v tejto oblasti pomerne široké. Keď laserom preteká prúd vyšší ako prahový prúd i_0, tak koeficient zisku g prevýši koeficient strát α a dochádza ku silnej stimulovanej emisii – spektrum emitovaného žiarenia je úzke. Prekročenie prahového prúdu sa prejaví aj v grafe závislosti vysielaného žiarivého toku Φ_e na prúde tečúcom laserovou diódou (t.j. vo svetelnej charakteristike): smernica tejto závislosti sa v okolí i_0 prudko zvýši.
Ak látka má byť zdrojom koherentného laserového žiarenia, musí byť splnená ešte jedna podmienka: látka musí byť umiestnená v rezonátore (medzi dvoma planparalelnými zrkadlami). V polovodičovom laseri je to realizované tak, že kryštál polovodiča sa opracuje do tvaru hranola tak, aby jeho čelné steny boli kolmé k vrstve P – N prechodu a tvorili Fabry – Perotov rezonátor.

Výkonová účinnosť

Dôležitým parametrom laserovej diódy je jej výkonová účinnosť η, ktorá je definovaná ako

$$h = \frac{\Phi_e}{P}, \tag{1}$$

kde Φ_e je žiarivý tok a $P = Ui$ je elektrický príkon laserovej diódy.

Vznik laserových módov

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

$$2Lk_m = m2p\ , \tag{2}$$

kde m je celé číslo charakterizujúce vlnový mód a k_m príslušný vlnový vektor. Pre rozdiel veľkosti vlnových vektorov Δk dvoch susediacich módov platí

$$\Delta k = k_{m+1} - k_m = \frac{p}{L}. \tag{3}$$

Pomocou vzťahu pre grupovú rýchlosť

$$v_g = \frac{\Delta w}{\Delta k} = \frac{c}{N_g}, \tag{4}$$

kde ω je kruhová frekvencia vlny, c jej rýchlosť a N_g grupový index lomu, môžeme vyjadriť vzdialenosť dvoch susedných módov, pre ktorú v stupnici vlnových dĺžok platí

$$\Delta l = \frac{l^2}{2LN_g}. \tag{5}$$

Pre grupový index lomu aktívnej oblasti polovodičového lasera podľa [1] platí

$$N_g = 4{,}5. \tag{6}$$

Výsledky meraní:

Svetelná a voltampérová charakteristika

Pre prúdy od 0 do 116 *mA* som zároveň zmeral svetelnú i voltampérovú charakteristiku GaAs lasera. Napätie a prúd som určoval pomocou digitálnych multimetrov (napätie pri rozsahu 2 *V* a prúd pri rozsahu 200 *mA*). Chybu určenia napätia a prúdu uvažujem posledné zobrazované miesto na digitálnom multimetri. Výkon lasera som meral pomocou galvanometra, pričom jeho chybu odhadujem na polovicu jedného dielika. Žiarivý tok som určil podľa pokynov pri úlohe: pri prúde laserom je výstupný svetelný tok 0,5 *mW*.
Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v *tabuľke 1* a zobrazené v *grafe 1* (voltampérová charakteristika) a v *grafe 2* (svetelná charakteristika).

Tabuľka 1 – Svetelná a voltampérová charakteristika lasera

U [V]	*I [mA]*	*Φ_e [r.j.]*	*Φ_e [μW]*
1,074	0,1	0	0,0
1,168	0,2	0	0,0
1,225	0,4	0	0,0
1,296	1,1	3	0,5
1,345	2,1	9	1,4
1,374	3,1	20	3,1
1,407	5,0	37	5,7
1,460	10,0	50	7,7
1,497	15,0	90	13,8
1,528	20,0	130	20,0
1,555	24,8	180	27,7
1,581	30,0	220	33,8
1,605	35,0	260	40,0
1,627	40,0	310	47,7
1,648	44,8	350	53,8
1,669	49,7	390	60,0
1,692	55,2	460	70,8
1,709	59,6	550	84,6
1,728	64,5	600	92,3
1,747	69,6	700	107,7
1,765	74,4	800	123,1
1,784	79,4	900	138,5
1,797	83,5	1050	161,5
1,816	88,8	1200	184,6
1,829	92,5	1350	207,7
1,838	95,0	1450	223,1
1,845	97,3	1600	246,2
1,852	99,3	1700	261,5
1,858	101,3	1800	276,9
1,869	104,3	2000	307,7
1,874	106,2	2150	330,8
1,881	108,2	2300	353,8
1,886	109,9	2500	384,6
1,892	111,8	2700	415,4
1,898	113,6	3000	461,5
1,900	114,5	3200	492,3
1,902	115,0	3250	500,0
1,903	115,5	3400	523,1
1,905	116,0	3500	538,5

r.j. označuje relatívne jednotky galvanometra. Preložením lineárnej časti *grafu 2* priamkou pomocou programu *Origin* som zistil prahovú hodnotu prúdu i_0. Chybu určenia i_0 som určil podľa kvadratického zákona prenosu chýb, viď [2].

$$i_0 = (99{,}1 \pm 9{,}6)\,mA$$

Kalibrácia monochromátora

Monochromátor som okalibroval pomocou *Hg* výbojky, ktorej spektrum je znázornené v *grafe 3*. Pomocou [1] som jednotlivé maxima nameraného spektra priradil ich vlnovým dĺžkam. Namerané hodnoty sú uvedené v *tabuľke 2*.

Tabuľka 2 – Priradenie maxím Hg výbojky ich vlnovým dĺžkam

krok motora [r.j.]	17,6089265	17,6681894	18,2000741	20,2794617	20,8602387	20,9002408
λ [nm]	404,7	407,8	435,8	546,1	577,0	579,1

Namerané hodnoty sú zobrazené v *grafe 4*. Týmito hodnotami som pomocou programu *Origin* preložil priamku, a tak som určil prevodný vzťah pre vlnovú dĺžku λ

$$l\,[nm] = (-528{,}76 \pm 0{,}54) + (53{,}005 \pm 0{,}027)\,l\,[r.j.]$$

Emisné spektrum lasera

Emisné spektrum lasera som meral pri šírke štrbiny 0,24 *mm* pre čerpacie prúdy 115,0 *mA* (použil som 5-násobné zosilnenie), 110,0 *mA* (5-násobné zosilnenie), 90,0 *mA* (20-násobné zosilnenie) a 80,0 *mA* (50-násobné zosilnenie). Na zníženie intenzity lasera som použil matnicu (bez matnice som dostával spektrum, ktoré nezodpovedalo teoreticky očakávanej závislosti). Namerané hodnoty sú zobrazené v *grafe 5*.
Pre čerpací prúd $I = 115{,}0\,mA$ som určil maximum stimulovanej emisie

$$l_{\max} = (816{,}3 \pm 1{,}0)\,nm\,.$$

Chybu λ_{max} odhadujem podľa toho, že v nameranom spektre sa nedalo určiť práve jednu hodnotu ako maximálnu, t.j. uvažujem $s_{l_{\max}} = 1\,nm$.

Módová štruktúra emisného spektra

Módovú štruktúru som určil pre čerpací prúd $I = 115{,}0\,mA$ a šírku štrbiny 0,06 *mm*. Pri meraní som použil 20-násobné zväčšenie (pri väčšom zväčšení sa oveľa viac prejavoval šum). Nameraná závislosť je zobrazená v *grafe 6*. V rozsahu od 812 *nm* do 823 *nm* som určil šírku jednotlivých módov.
Určené hodnoty sú uvedené v *tabuľke 3*.

Tabuľka 3 – Módová štruktúra emisného spektra

λ [nm]	*Δλ [nm]*	*L [μm]*
812,243	0,314	233
812,557	0,275	267
812,832	0,314	234
813,146	0,314	234
813,461	0,314	234
813,775	0,314	234
814,089	0,314	234
814,403	0,275	268
814,678	0,314	235
814,992	0,353	209
815,345	0,275	269
815,620	0,314	235
815,934	0,275	269
816,209	0,314	236

816,523	0,314	236
816,837	0,314	236
817,152	0,314	236
817,466	0,314	236
817,780	0,314	237
818,094	0,314	237
818,408	0,275	271
818,683	0,353	211
819,036	0,275	271
819,311	0,353	211
819,665	0,314	238
819,979	0,275	272
820,254	0,353	212
820,607	0,314	238
820,921	0,314	238
821,235	0,314	239
821,549	0,314	239
821,863	0,314	239
822,178	0,314	239
822,492	0,275	273

Pre výslednú hodnotu $\Delta\lambda$ platí

$$\Delta l = (0{,}309 \pm 0{,}023) nm ,$$

kde chybu $\Delta\lambda$ uvažujem ako smerodajnú odchýlku aritmetického priemeru hodnôt, viď [2].
Podľa vzťahu (5) s využitím (6) som určil dĺžku rezonátora L

$$L = (241 \pm 14) mm .$$

Chybu určenia L som určil podľa kvadratického zákona prenosu chýb, viď [2].

Výkonová účinnosť lasera

Pre prúd laserom 115 mA podľa vzťahu (1) platí

$$h_{I=115\,mA} = (0{,}229 \pm 0{,}004)\% ,$$

kde chybu η som určil podľa kvadratického zákona prenosu chýb.

Diskusia:

Svetelná a voltampérová charakteristika

Nameraná svetelná i voltampérová charakteristika polovodičového lasera zodpovedá teoretickým predpokladom.

Zo svetelnej charakteristiky som určil prahovú hodnotu prúdu i_0: bodmi, pri ktorých svetelná charakteristika začala prudko stúpať, som preložil priamku a z jej rovnice som určil hodnotu i_0. Priamku som prekladal len poslednými 5 nameranými bodmi; s tým súvisí aj relatívna chyba určenia i_0, ktorá je 9,7 %. Hodnota i_0 by sa dala určiť presnejšie, keby svetelná charakteristika bola zmeraná aj pre vyššie hodnoty prúdu (no to by viedlo k poškodeniu lasera).

Kalibrácia monochromátora

Charakteristickým maximám v emisnom spektre *Hg* výbojky som priradil zodpovedajúce vlnové dĺžky. Týmito bodmi som preložil priamku. Z *grafu 4* vyplýva, že nameraná závislosť dobre popísaná lineárnou závislosťou: relatívna chyba určenia regresných koeficientov je 0,06 % a 0,09 %.

Emisné spektrum lasera

Namerané emisné spektra lasera pre rôzne hodnoty čerpacieho prúdu sú znázornené v *grafe 5*. Z tohto grafu vyplýva, že hodnoty prúdu $I = 115\,mA$ a $I = 110\,mA$ sú nadprahové, pretože spektrum je úzke – zužuje sa okolo vlnovej dĺžky, pri ktorej prebieha stimulovaná emisia.

Nad prahovou hodnotou prúdu i_0 dochádza k výraznému zvýšeniu emisie na stimulovanej vlnovej dĺžke, zatiaľ čo emisia na nestimulovaných vlnových dĺžkach je takmer nezmenená.

Hodnoty prúdu $I = 90\,mA$ a $I = 80\,mA$ sú podprahové, pretože namerané spektrum je široké – je to typické elektroluminiscenčné diódy (stimulovaná emisia je pre tieto prúdy malá).

Módová štruktúra emisného spektra lasera

Módová štruktúra spektra ja znázornená v *grafe 6*. Pri meraní módovej štruktúry sa používa veľmi úzka štrbina monochromátora, pretože tým sa zvyšuje rozlišovacia schopnosť monochromátora, a tak sa dá určiť namodulovaná jemná štruktúra emisného spektra polovodičového lasera (t.j. užšia štrbina znamená menší rozsah vlnových dĺžok vystupujúcich štrbinou a lepšie rozlíšenie).

Záver:

Zmeral som svetelnú a voltampérovú charakteristiku polovodičového lasera, ktorú sú znázornené v *grafe 1* a v *grafe 2*. Zo svetelnej charakteristiky som určil prahovú hodnotu prúdu

$$i_0 = (99{,}1 \pm 9{,}6)\,mA\,.$$

Zmeral som emisné spektrum *Hg* výbojky, ktoré je znázornené v *grafe 3*. Pomocou tohto spektra som okalibroval monochromátor, a tak som určil prevodný koeficient pre vlnovú dĺžku

$$l\,[nm] = (-528{,}76 \pm 0{,}54) + (53{,}005 \pm 0{,}027)\,l\,[r.j.]$$

Zmeral som emisné spektrum polovodičového lasera pre 4 hodnoty prúdu I laserom (viď *graf 5*). Pre prúd $I = 115{,}0\,mA$ som určil vlnovú dĺžku stimulovanej emisie

$$l_{\max} = (816{,}3 \pm 1{,}0)\,nm\,.$$

Zmeral som módovú štruktúru polovodičového lasera (viď *graf 6*) a z nej som určil dĺžku aktívnej oblasti rezonátora L

$$L = (241 \pm 14)\,mm\,.$$

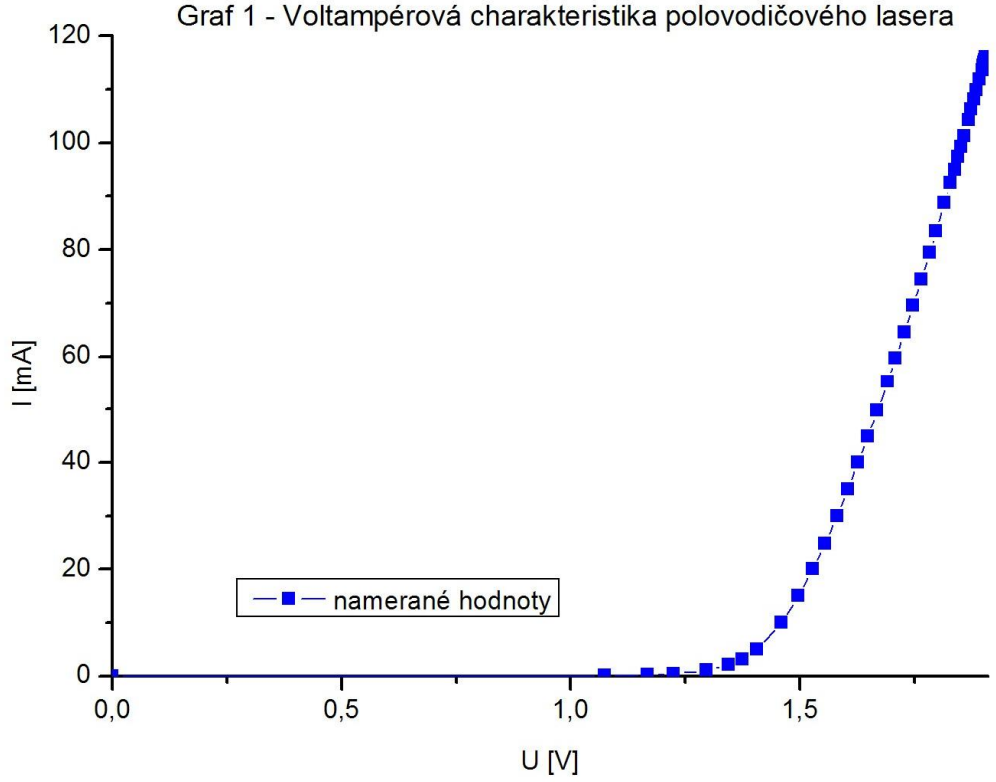
Pre prúd $I = 115{,}0\,mA$ som určil výkonovú účinnosť lasera

$$h_{I=115\,mA} = (0{,}229 \pm 0{,}004)\%\,.$$

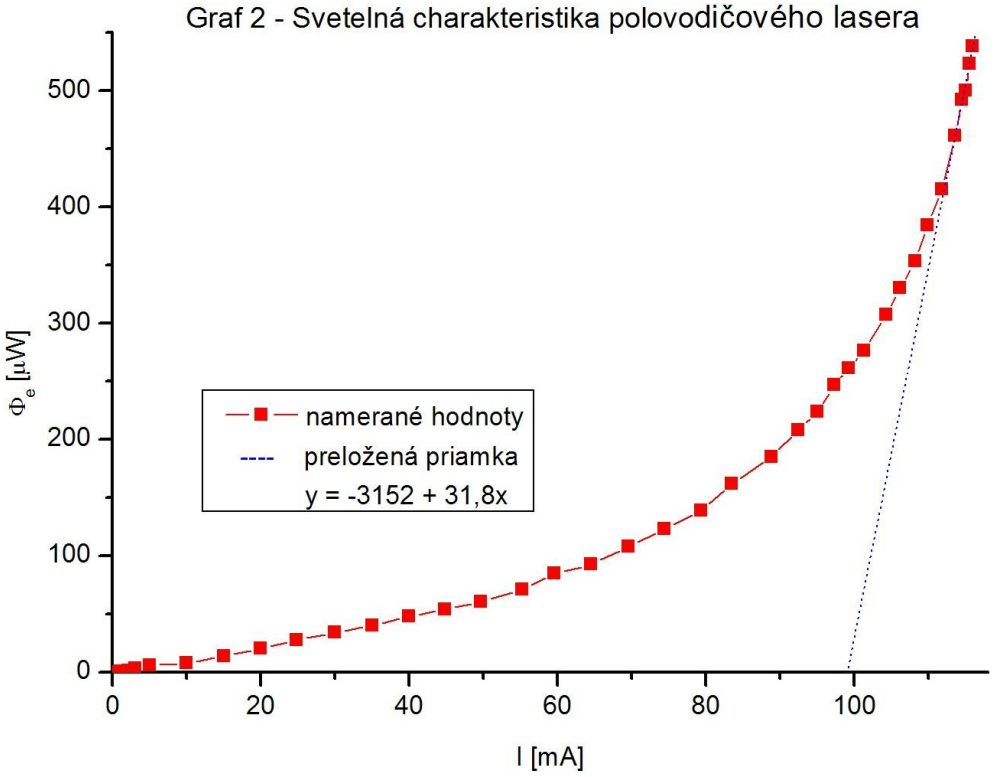
Literatúra:

[1] Ivan Pelant a kol.; Fyzikální praktikum III, Praha, 2001
[2] Englich, J.; Zpracovaní výsledků fyzikálních měření, Praha, 1999

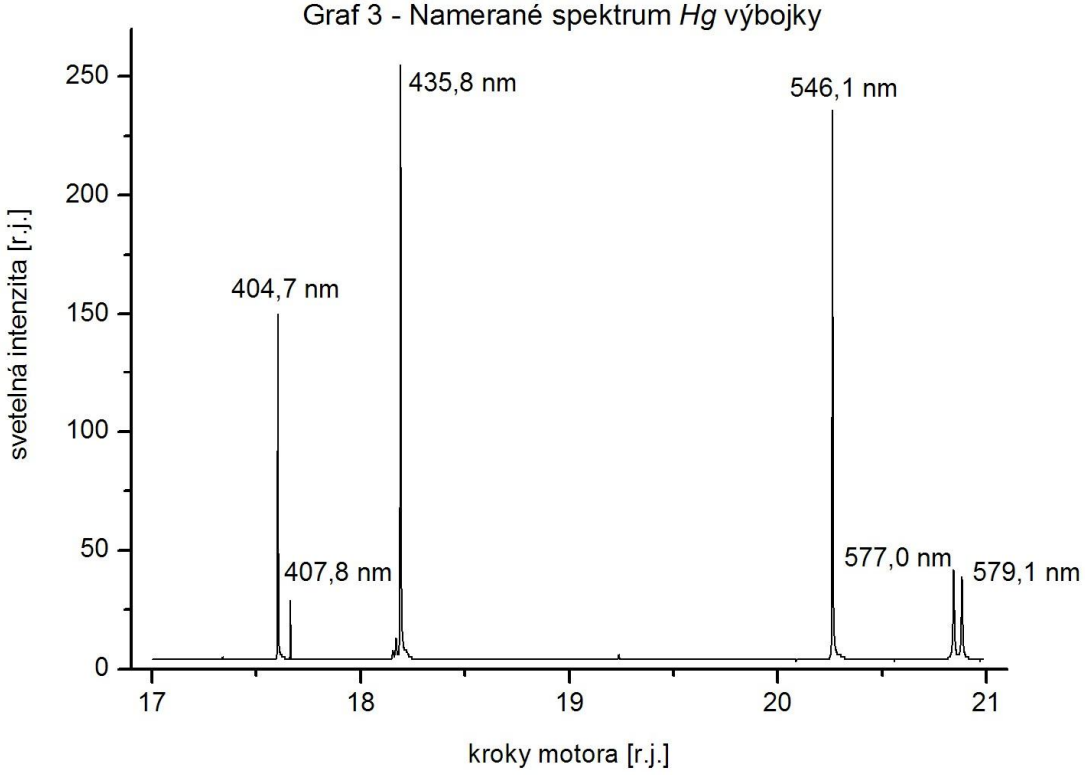
Graf 1 - Voltampérová charakteristika polovodičového lasera



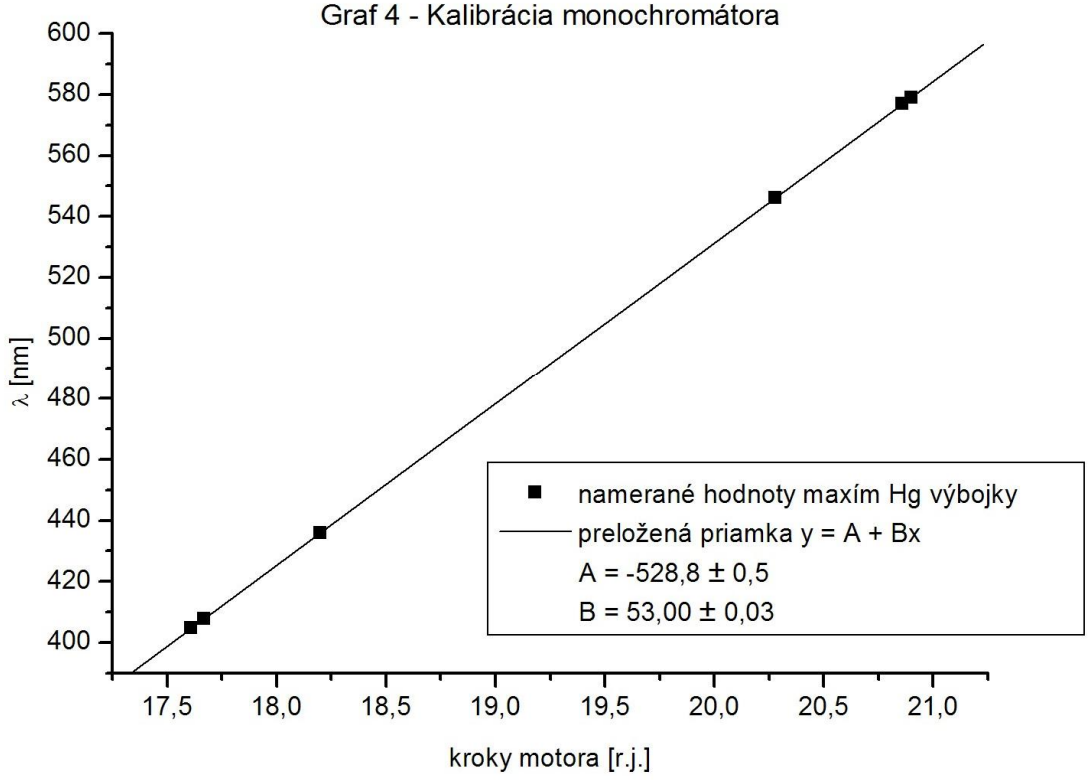
Graf 2 - Svetelná charakteristika polovodičového lasera



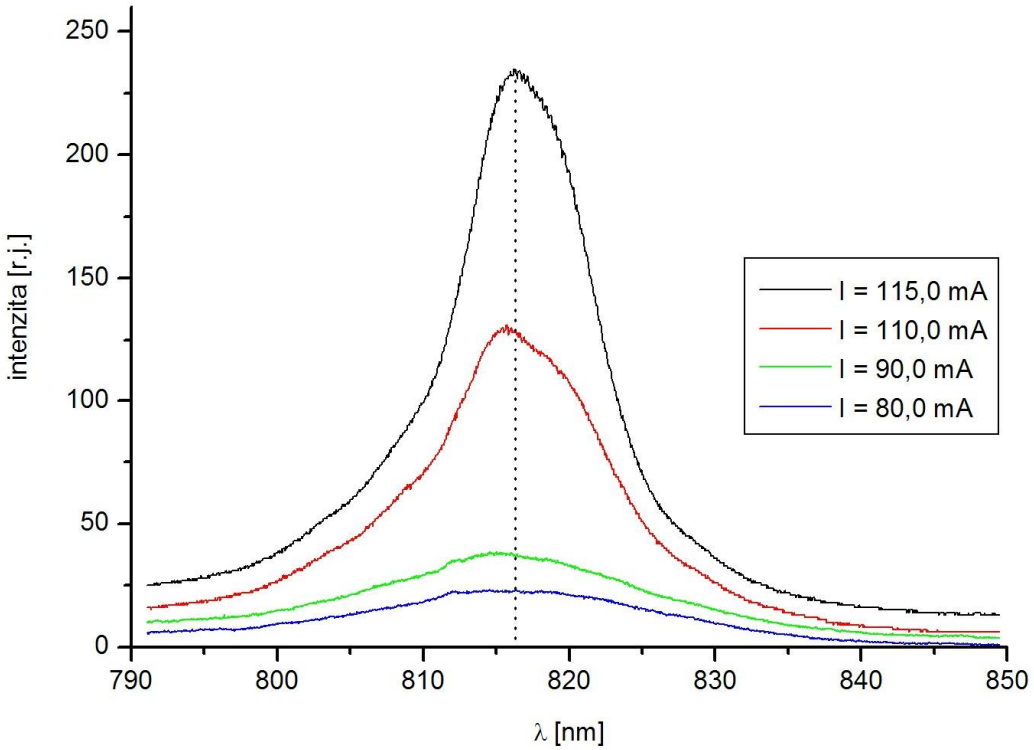
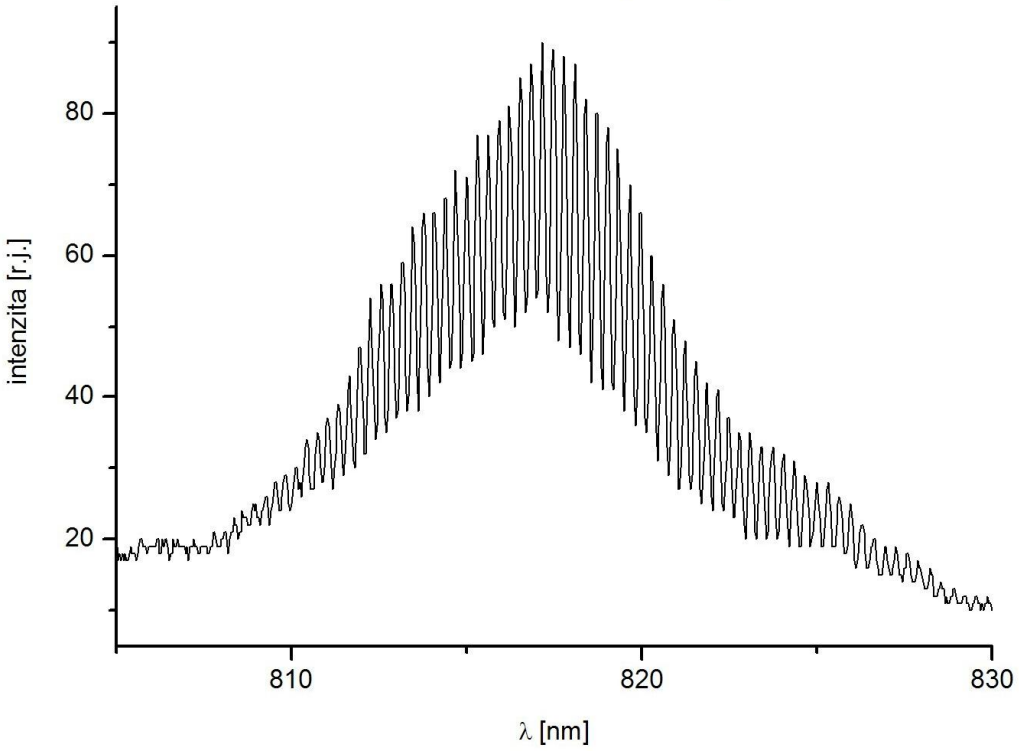
Graf 3 - Namerané spektrum *Hg* výbojky



Graf 4 - Kalibrácia monochromátora



Graf 5 - Emisné spektrum polovodičového lasera pre rôzne čerpacie prúdy



Graf 6 - Módová štruktúra emisného spektra polovodičového lasera