Pracovní úkol

1. Změřte současně světelnou i voltampérovou charakteristiku polovodičového laseru. Naměřené závislosti zpracujte graficky. Stanovte prahový proud i_0.
2. Pomocí Hg výbojky výbojky okalibrujte stupnici monochromátoru `SPM2`
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. Z modové struktury emisního spektra laseru určete délku aktivní oblasti rezonátoru. Diskutujte, proč je volena velmi úzká štěrbina monochromátoru.
5. Určete výkonovou účinnost laseru pro vybranou hodnotu proudu v nadprahové oblasti.

Teorie

Polovodičový laser je tvořen P-N přechodem zapojeným v propustném směru. Při průchodu proudu vzniká při nízkých hodnotách proudu v oblasti přechodu pouze spontánní emise, tj. laser pracuje jako dioda. Emisní spektrum vysílaného záření je široké. Při zvyšování hodnoty proudu se zvyšuje koeficient zisku a překročí-li proud určitou kritickou hodnotu i_0, tzv. prahový proud, převýší zisk ztráty a nastupuje zesílení záření stimulovanou emisí. Po jeho překročení se spektrum emitovaného záření výrazně zúží.

Mezi důležité parametry laserové diody patří její výkonová účinnost η, definovaná jako

$$\eta = \frac{\Phi}{P}\,, \tag{1}$$

, kde Φ je zářivý tok diody a P je elektrický příkon diody.

Mezi odrazovými plochami laseru o délce L, vzniká stojaté elektromagnetické vlnění, pro které platí

$$m\frac{\lambda_p}{2} = L \;\; \check{c}ili \;\; Lk_m = m\pi\,, \tag{2}$$

kde m je celé číslo charakterizující vlnový mód, k_m příslušný vlnový vektor a λ_p vlnová délka v polovodiči. Dostáváme tedy diskrétní laserové spektrum. Vzdálenost dvou sousedních módů můžeme vyjádřit jako

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2LN_g}\,, \tag{3}$$

kde N_g je grupový index lomu. Pro GaAs laser platí

$$N_g = 4.5\,.$$

I[mA]	U[V]	G[dil]	Φ[mW]	P[mW]	η[%]
9.12	1.452	0.5	0.01	13.24	0.08
19.75	1.526	1.0	0.02	30.14	0.07
29.3	1.577	1.5	0.03	46.21	0.06
39.9	1.626	2.0	0.04	64.88	0.06
49.7	1.669	3.0	0.06	82.95	0.07
60.3	1.711	4.0	0.08	103.17	0.08
70.2	1.749	5.5	0.11	122.78	0.09
75.0	1.766	6.0	0.12	132.45	0.09
80.2	1.785	7.0	0.14	143.16	0.10
85.1	1.802	8.0	0.16	153.35	0.10
90.3	1.821	9.0	0.18	164.44	0.11
95.5	1.838	11.0	0.22	175.53	0.13
100.6	1.856	13.0	0.26	186.71	0.14
105.2	1.870	19.0	0.38	196.72	0.19
109.8	1.885	15.0	0.30	206.97	0.14
114.9	1.900	27.5	0.55	218.31	0.25

Tabulka 1.: Světelná a voltamperová charakteristika laseru

Měření

Nejprve jsem proměřila světelnou a voltamperovou charakteristiku laseru. Měření bylo prováděno při šířce štěrbiny 0.025 *mm*. Zářivý tok byl změřen pomocí fotodiody. Výsledky spolu s naměřenými daty udává Tabulka 1, kde P značí příkon vypočítaný jako součin proudu a napětí a G je hodnota odečtená na galvanometru. Pomocí neokalibrovaného galvanometru jsem měřila světelný tok Φ. Závislost výchylky na světelném toku lze však považovat za lineární, proto při znalosti $\Phi(I = 115\,\mathrm{mA}) = 0.5\,\mathrm{mW}$ (udáno výrobcem), můžeme vypočítat Φ. Veličina η je určena dle vztahu (1). Chybu určení proudu a napětí odhaduji na 1 digit, chybu galvanometru na 0,5 dílku.

Voltamperová charakteristika je vynesena v Grafu 1, který je jako všechny následující grafy přiložen na konci dokumentu. Světelná charakteristika je v Grafu 2. Z ní lze určit metodou extrapolace v lineární oblasti grafu prahový proud i_0

$$i_0 = (89 \pm 17)\,\mathrm{mA}\,.$$

Dále jsem pomocí počítačového programu provedla kalibraci posunu monochromátoru a kalibraci stupnice pomocí rtuťové výbojky, což mi umožní vypočítat z hodnot odečtených na stupnici monochromátoru vlnovou délku procházejícího světla. Předpokládám lineární závislost dílků na stupnici na vlnové délce. Spektrum rtuti je zakresleno v Grafu 4. Srovnáním spektrální charakteristiky rtuťové výbojky s naměřenými daty jsem určila odpovídající spektrální čáry. V Tabulce 2 jsou zapsány vlnové délky spektrálních čar a jim odpovídající dílky na stupnici monochromátoru.

Pomocí programu `Gnuplot` jsem lineární regresí zjistila přepočetní vztahy

$$\lambda[\mathrm{nm}] = (53.13 \pm 0.02) \cdot \text{dílky} - (530.8 \pm 0.4)\,, \tag{4}$$

$$\text{dílky} = (7.407 \pm 0.002) \cdot 10^{-4} \cdot \text{kroky} \tag{5}$$

n [dílek]	λ [nm]
17.606	404.7
17.666	407.8
18.194	435.8
20.268	546.1
20.849	577.0
20.889	579.0

Tabulka 2.: Kalibrace monochromátoru

Chyba je dána statistickou chybou lineární regrese.

Poté jsem změřila emisní spektrum laseru pro proudy 80.0, 90.0, 110.2 a 115.0 mA. Grafické zpracování je vyneseno v Grafu 5. Charakteristiky jsem měřila při šířce štěrbiny 0.4 mm. Nastavení aparatury bylo po celou dobu měření stejné, pouze pro proud 90mA, resp. 80mA jsem 5×, resp. 10× zvýšila intenzitu. Hodnoty vynesené v grafu jsou ovšem již po vydělení tak, aby si intenzity vzájemně odpovídaly. Vlnovou délku stimulované emise jsem určila z křivky v Grafu 5 v nadprahovém proudu 115mA, protože zde je nejvíce patrný peak. Vlnová délka stimulované emise je

$$\lambda_{\max} = (817.1 \pm 1.0)\,\mathrm{nm}$$

Z grafu je zřejmé, že mezi proudy 90.0 a 110.2 byla překročena prahová hodnota proudu i_0. Při rostoucí hodnotě proudu je patrné zúžování spektra vyzařovací křivky, což je způsobeno převahou stimulované emise nad spontánní.

Modovou strukturu spektra jsem pozorovala při zmenšení výstupní štěrbiny na 0.055 mm. Naměřená data pro proud laserem 110.2 mA jsou v Grafu 6. Délku aktivní oblasti lze určit z (3), spočítáme-li např. 50 módů v oblasti s hranicemi $\lambda_1 = (811.9 \pm 0.1)\,\mathrm{nm}$ a $\lambda_2 = (826.0 \pm 0.1)\,\mathrm{nm}$. Střední hodnota tedy je $\lambda = (819.0 \pm 0.2)\,\mathrm{nm}$ a $\Delta\lambda = (0.282 \pm 0.007)\,\mathrm{nm}$. Dle (3) je tudíž délka aktivní oblasti laserového rezonátoru

$$L = (263 \pm 7)\,\mathrm{nm}$$

Chyba je určena na základě odchylek λ a $\Delta\lambda$ dle standatdní teorie šíření chyb. Více viz [2].

Závislost účinnosti na procházejícím proudu je vynesena v Grafu 3. Nadprahový proud je například $I_n = (114.9 \pm 0,1)\,\mathrm{mA}$. Tomu odpovídá $U_n = (1.900 \pm 0.001)\,\mathrm{V}$, $\Phi = (0.550.01)\,\mathrm{mW}$, $P = (218.3 \pm 0.3)\,\mathrm{mW}$ (hodnoty viz Tabulka 1). Tedy výkonová účinnost pro mnou vybranou hodnotu proudu je

$$\eta = (0.25 \pm 0.01)\,\%.$$

Diskuze

Z grafu světelné charakteristiky (Graf 2) je zřejmé, že pro určení prahového proudu je změřeno příliš málo hodnot v nadprahové oblasti. Na korektní extrapolaci by bylo nutné proměřit závislost důkladněji. Nedostatečný počet měření se také projevil ve velké odchylce i_0 (19 %). Přesnější by bylo určit i_0 z vyzařovací charakteristiky (Graf 5), kdy je zřejmé, že prahová hodnota byla překročena mezi proudy 90.0 a 110.2 mA. Lze tedy odhadnout i_0 na $(100 \pm 10)\,\mathrm{mA}$.

Intenzity čar ve spektru rtuťové výbojky byly v porovnání s tabelovanými hodnotami odlišné. Může to být způsobeno činností fotonásobiče, který je zřejmě více citlivý na kratší vlnové délky.

Z Grafu 5 je zřejmé, že vyzařovací charakteristiky laseru jsou pro 80 a 90 mA podprahové a vtéto oblasti se chová přístroj jako laserová dioda. Proudy 110 a 115 mA jsou nadprahové a především pro nejvyšší proud je zřetelný ostrý peak. Z této hodnoty byla určena vlnová délka stimulované emise. Peak je asymetrický, takže byl zřejmně zachycen vedlejší mód. Patrná je také neshoda tvaru grafu vyzařovací charakteristiky pro nadprahové proudy a modové struktury spektra (grafy jsou osově symetrické), kterou si nedovedu vysvětlit, protože měření se lišila pouze v šířce použité štěrbiny.

Módy byly jasně pozorovatelné. Měření bylo provedeno při proudu 110.2 mA. Pro určení aktivní oblasti bylo napočítáno 50 módů, aby se snížila relativní chyba rozdílu vlnových délek. Při měření bylo třeba nastavit dostatečně malou šířku výstupní štěrbiny, tedy tak, aby její spektrální šířka byla nižší nez rozdíl jednotlivých módů. To je patrné i z Grafu 5, kdy není vidět modulace, tedy šířka štěrbiny byla příliš velká.

Závěr

V tomto praktiku jsem se seznámila s činností polovodičového laseru. Změřila jsem jeho voltampérovou a světelnou charakteristiku. Výsledky udávají Grafy 1-3. Prahový proud jsem stanovila jako (viz diskuze) $i_0 = (100 \pm 10)\,\mathrm{mA}$.

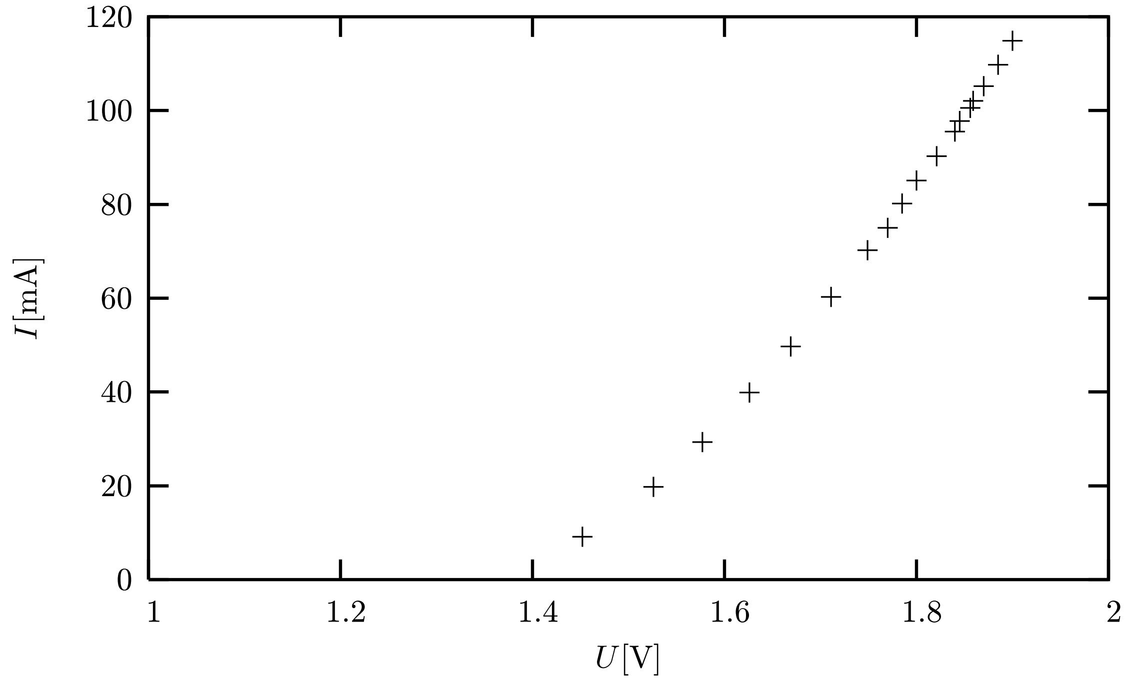
Dále jsem okalibrovala monochromátor a změřila emisní spektrum laseru (viz Graf 5). Vlnová délka stimulované emise GaAs laseru je $\lambda_{\mathrm{max}} = (817.1 \pm 1.0)\,\mathrm{nm}$.

Při větším spektrálním rozlišení jsem změřila modovou strukturu (viz Graf 6). Délku aktivní oblasti jsem určila jako $L = (0.263 \pm 0.007)\,\mathrm{mm}$. Výkonová účinnost laseru pro hodnotu proudu $I_n = (114.9 \pm 0,1)\,\mathrm{mA}$ je $\eta = (0.25 \pm 0.01)\,\%$

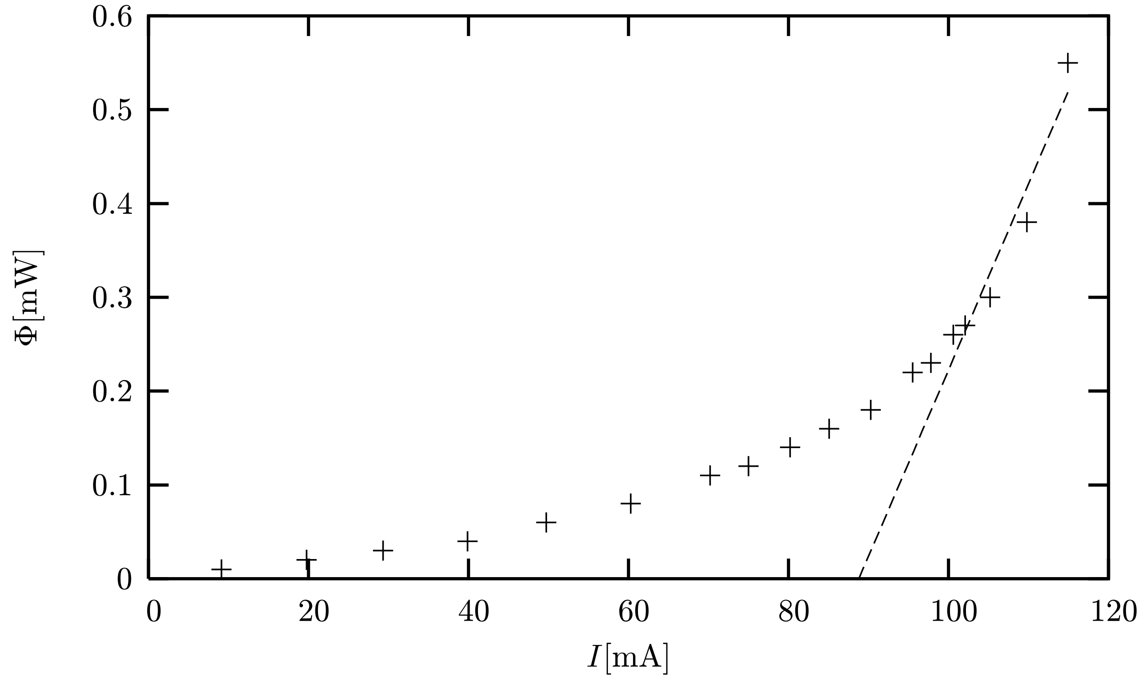
Literatura

[1] Fyzikální praktikum III., I. Pelant, J. Fiala, J. Pospíšil, J. Fähnrich, Praha 1993

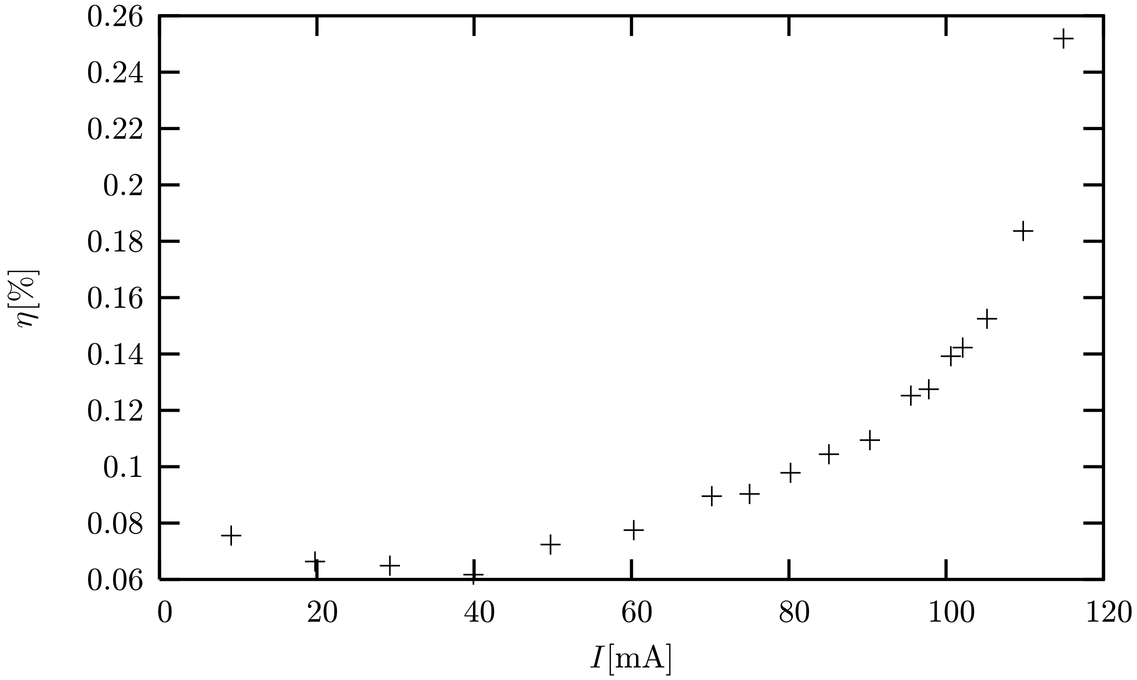
[2] Zpracování výsledků fyzikálních měření, J. Englich, Praha 2000



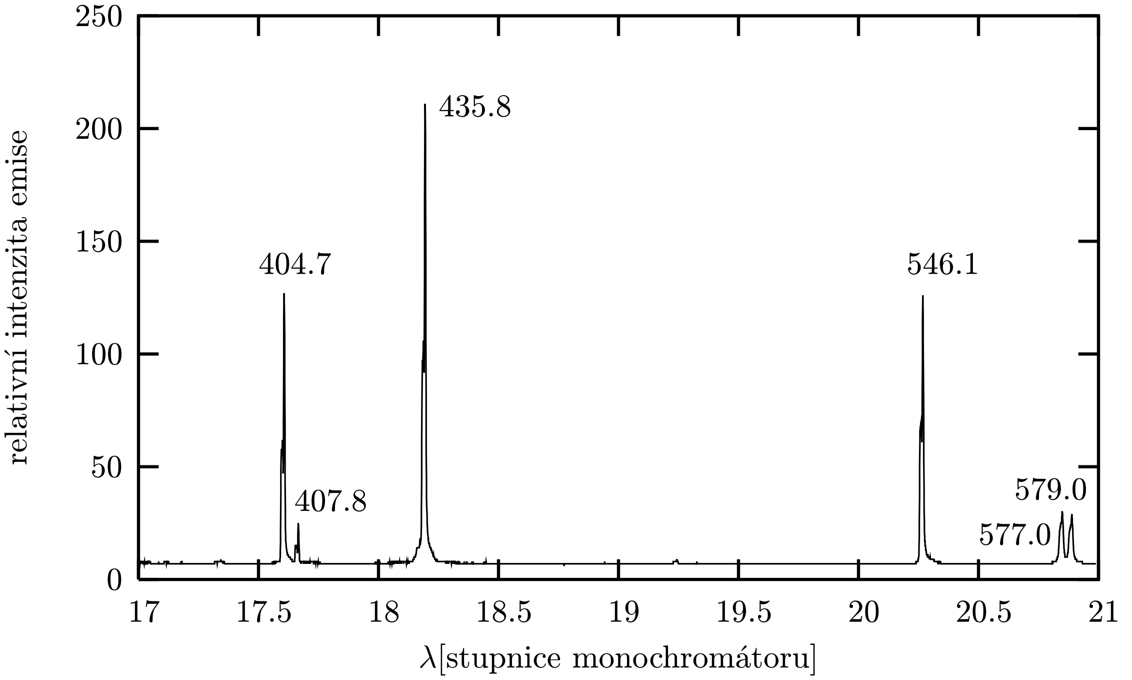
Graf 1.: Voltamperová charakteristika laseru



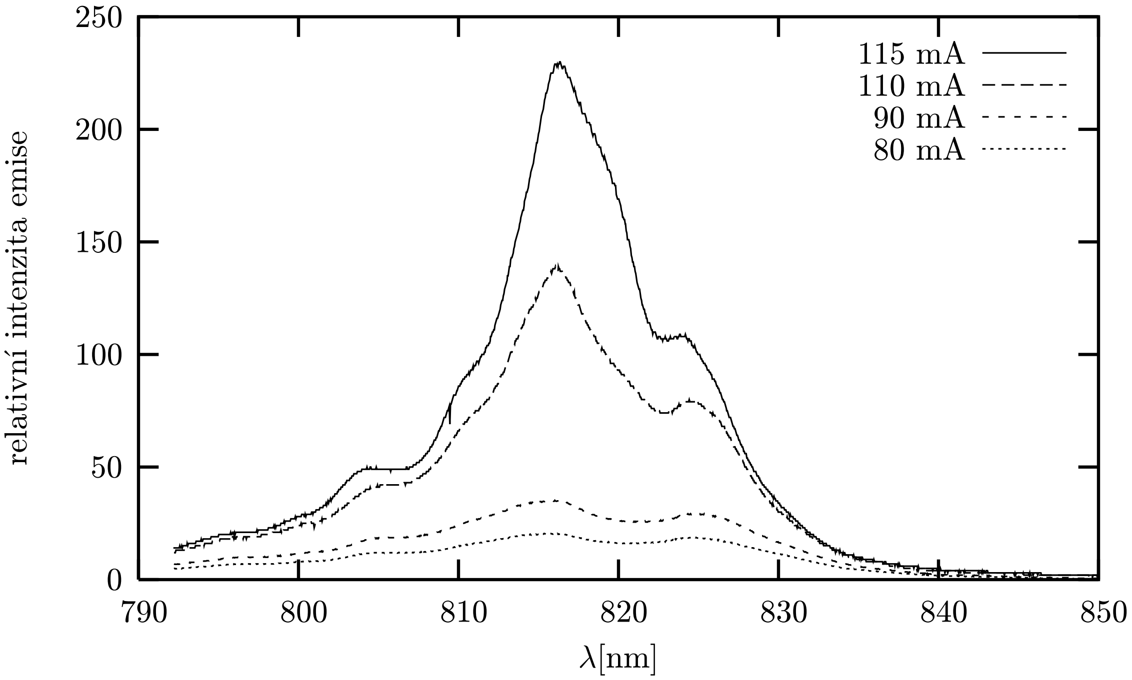
Graf 2.: Světelná charakteristika laseru



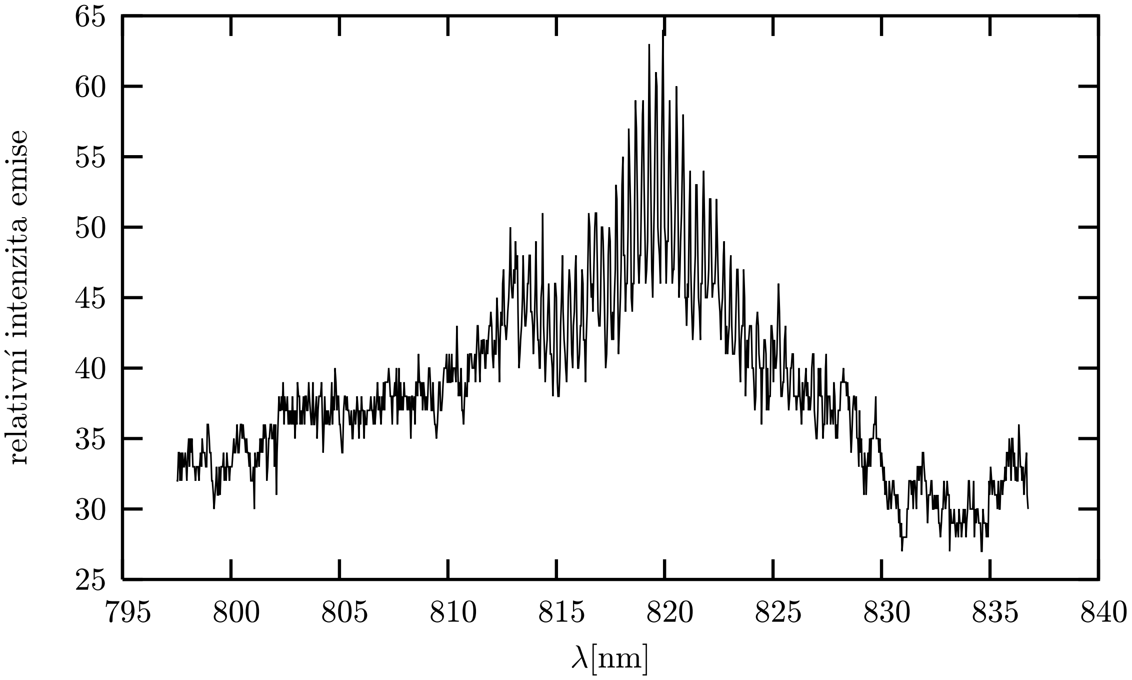
Graf 3.: Závislost úšinnosti laseru na procházejícím proudu



Graf 4.: Spektrum rtuťové výbojky



Graf 5.: Emisní spektrum laseru



Graf 6.: Modová struktura spektra laseru