

Pracovní úkol

1. Změřte současně světelnou i voltampérovou charakteristiku polovodičového laseru. Naměřené závislosti zpracujte graficky. Stanovte prahový proud i_0 .
2. Pomocí Hg výbojky okulibrujte stupnici monochromátoru SPM 2.
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.

Teoretický úvod

Základem polovodičového laseru je P–N přechod zapojený v propustném směru. Při nízkém průchozím proudu funguje jako obyčejná elektroluminiscenční dioda, při překročení tzv. *prahového proudu* ale dochází k stimulované emisi a rezonanci záření mezi vyleštěnými hranami krystalu, což z diody činí laser.

Spektrální závislost intenzity je podle [1] v důsledku rezonance modulována s periodou

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2LN_g}, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka, L je kolmá vzdálenost mezi hranami krystalu a N_g je tzv. *grupový index lomu*, který je pro zkoumaný krystal roven 4.5.

Výkonová účinnost laseru je definovaná jako

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \quad (2)$$

kde Φ je světelný výkon laseru a $P = UI$ jeho příkon.

Statistické zpracování

Hodnotu veličiny změřené opakovaně uvádíme jako $\bar{x} \pm \sqrt{s_{\bar{x}}^2 + \delta^2}$, kde

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

a δ je chyba měřidla.

Chybu veličiny $u = f(x_i)$ počítáme ze vztahu

$$\delta_u = \sqrt{\Delta \mathbf{x}^T \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \Delta \mathbf{x}}.$$

kde $\Delta x_i = (\partial_{x_i} f) \delta x_i$, δx_i jsou chyby veličin x_i a $\boldsymbol{\rho}$ je korelační matice. Pro nezávislé veličiny je $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{1}$.

Při fitování vztahu na naměřená data používáme program *Gnuplot*. Ten aplikuje metodu nejmenších čtverců. V případě lineárního fitování jsou parametry dopočítány algebraicky, v případě nelineárního iterativně. Chyby parametrů fitování mají stejné vlastnosti jako standardní směrodatné odchylky. Vypočítané parametry ovšem nemusí být nezávislé veličiny, je proto nutné s nimi dále pracovat pomocí korelační matice, kterou *Gnuplot* pro každý fit poskytuje.

Výsledky měření

Nejprve jsme měřili voltampérovou a světelnou charakteristiku laseru. Pomocí digitálního voltmetru a ampérmetru jsme odečítali napětí na diodě a proud, pomocí galvanometru potom relativní proud procházející fotodiodou, která zachycovala světlo generované laserem. Výrobce udává, že výkon laseru při 115 mA je roven 0.5 mW, pomocí čehož jsme naměřené relativní proudy fotodiodou přepočítali za předpokladu lineárního chování na světelný výkon. Výsledky jsou v Tabulce 1 a Obrázcích 1 a 2.

Přechod mezi spontánní a stimulovanou emisí je na grafu světelného výkonu velmi mírný. Ke zjištění prahového proudu jsme proložili přímky lineárními oblastmi před a po přechodu. Jejich průsečík bereme jako místo přechodu s výsledkem

$$i_0 = (96 \pm 2) \text{ mW}.$$

Pro další měření jsme nejprve museli nakalibrovat lineární stupnici monochromátoru. K tomu jsme využili známých vlnových délek spektrálních čar rtuťové výbojky. Při měření byla šířka štěrbin monochromátoru nastavena na 0.03 mm. Naměřené hodnoty ukazuje Tabulka 2, kde x je pozice na stupnici monochromátoru. Proložením přímkové závislosti jsme dostali

$$\frac{\lambda}{\text{nm}} = (53.05 \pm 0.02) \times x - (529.8 \pm 0.3).$$

Pomocí nakalibrovaného monochromátoru jsme naměřili spektra laseru při několika hodnotách příkonu. Šířka štěrbin byla při měření 0.4 mm. Výsledky jsou v Obrázku 3. Proložením paraboly v místě maxim kolem vlnové délky 813 nm jsme dostali vlnové délky stimulované emise v Tabulce 3. Zprůměrováním všech hodnot dostaneme

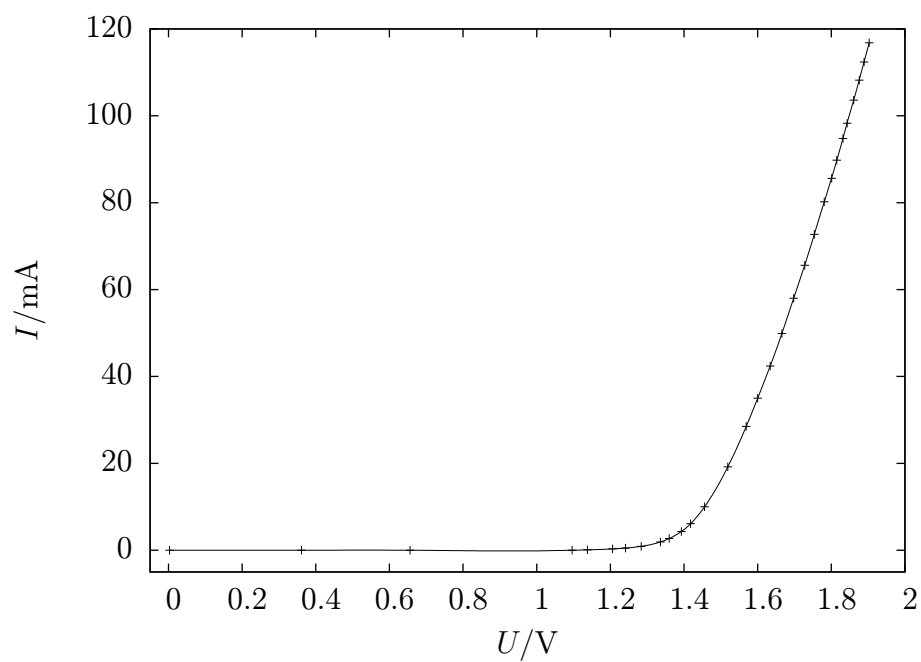
$$\lambda_{\text{max}} = 813.0 \pm 0.1 \text{ nm}.$$

I/mA	U/V	Φ/mW
0.0	0.003	0.0000
0.0	0.361	0.0000
0.0	0.656	0.0000
0.0	1.096	0.0000
0.1	1.138	0.0000
0.3	1.206	0.0000
0.5	1.241	0.0000
0.9	1.284	0.0000
1.9	1.336	0.0000
2.7	1.360	0.0013
4.3	1.393	0.0039
6.1	1.418	0.0064
10.0	1.456	0.013
19.2	1.519	0.027
28.5	1.569	0.045
35.0	1.600	0.059
42.4	1.634	0.077
49.9	1.666	0.099
58.0	1.698	0.125
65.6	1.728	0.15
72.7	1.754	0.18
80.2	1.781	0.21
85.6	1.801	0.23
89.8	1.815	0.26
94.8	1.832	0.30
98.3	1.843	0.32
103.6	1.861	0.36
108.2	1.876	0.41
112.4	1.889	0.46
116.8	1.903	0.53

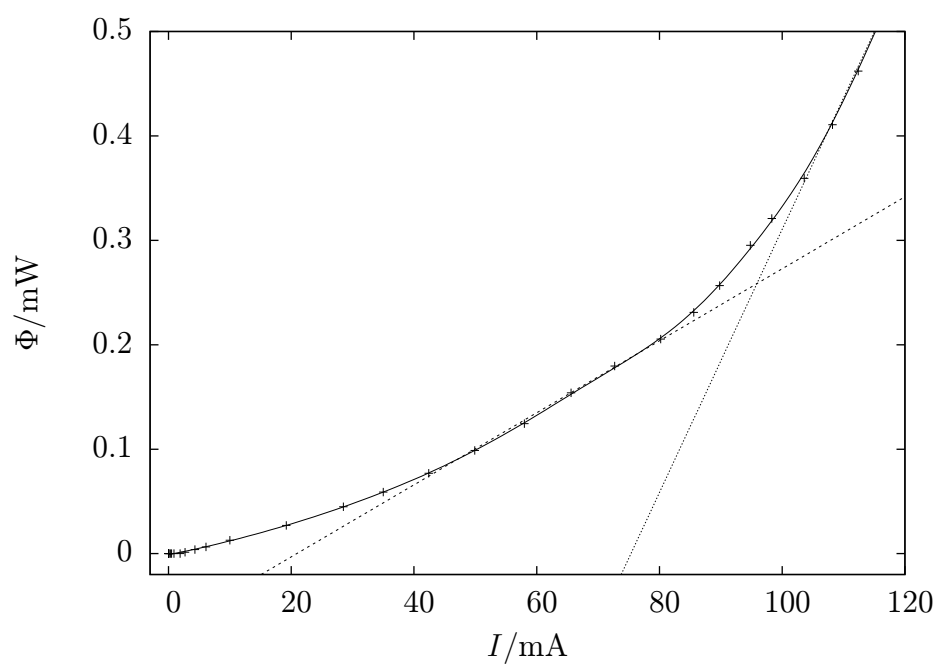
Tabulka 1: Měření charakteristik

λ/nm	x
404.7	17.6128
407.8	17.6724
435.8	18.2020
546.1	20.2794
577.0	20.8615
579.1	20.9014

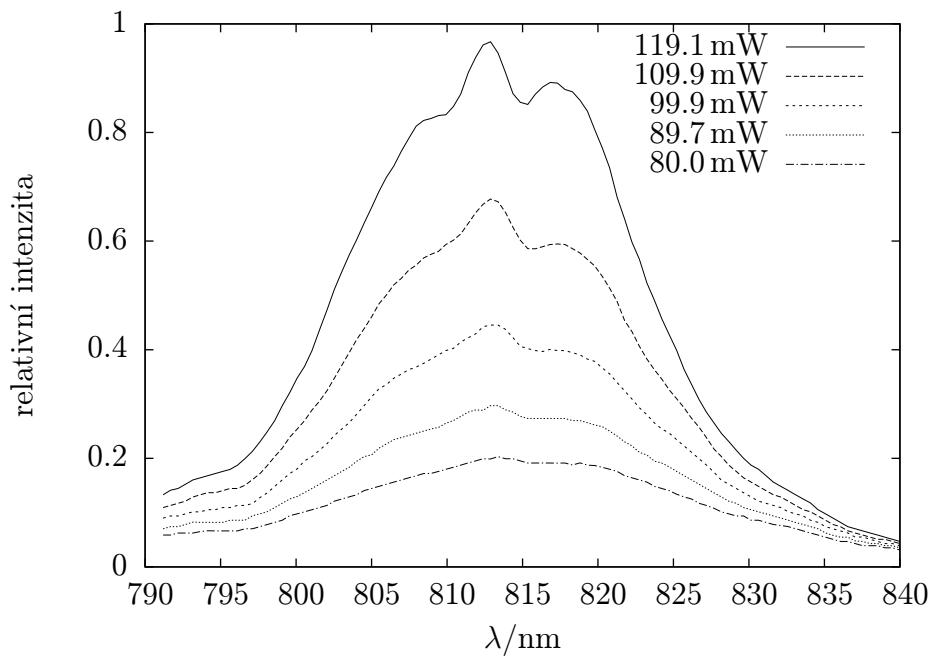
Tabulka 2: Kalibrace monochromátoru



Obrázek 1: Voltampérová charakteristika laseru



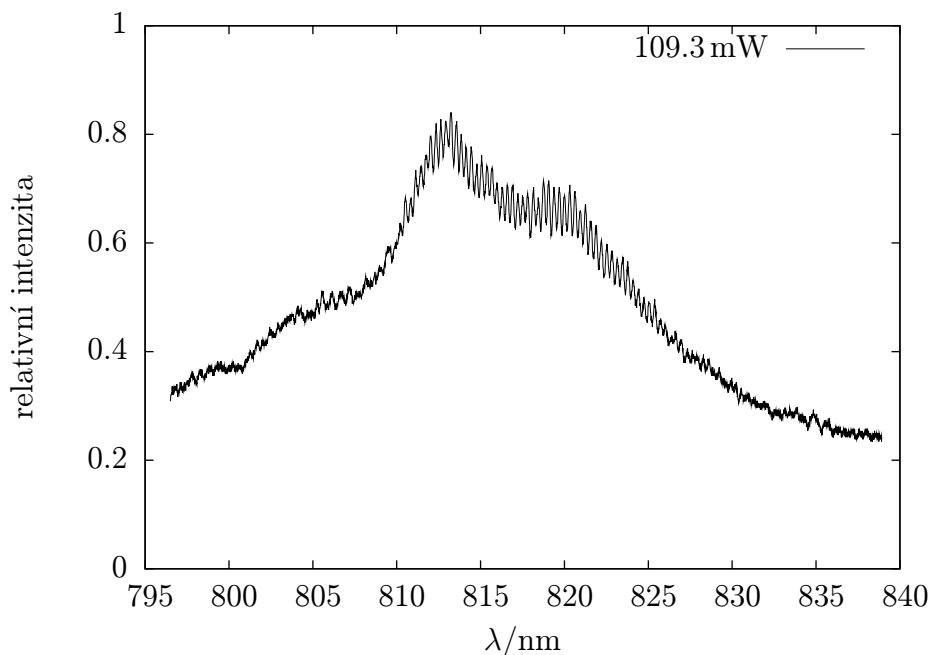
Obrázek 2: Světelný výkon laseru



Obrázek 3: Spektrální světelný výkon laseru

P/mW	$\lambda_{\text{max}}/\text{nm}$
119.1	812.71 ± 0.01
109.9	812.94 ± 0.01
99.9	812.97 ± 0.01
89.7	812.99 ± 0.02
80	813.15 ± 0.05

Tabulka 3: Stimulované vlnové délky



Obrázek 4: Modová struktura spektra laseru

λ/nm			
816.904	817.806	818.750	819.689
817.222	818.161	819.063	820.007
817.514	818.437	819.376	820.320

Tabulka 4: Maxima v modové struktuře spektra

Se štěrbinou nastavenou na 0.06 mm jsme proměřili spektrum pro nadprahovou vlnovou délku. Výsledek je na Obrázku 4. V okolí vlnové délky 818 nm jsme odečetli několik maxim, která jsou uvedena v Tabulce 4. Zprůměrováním maxim a jejich vzdáleností dostaneme

$$\lambda = (818.6 \pm 0.3) \text{ nm}, \quad \Delta\lambda = (0.311 \pm 0.006) \text{ nm}$$

a dosazením do (1)

$$L = (239 \pm 5) \mu\text{m}.$$

Lineární interpolací voltamérové charakteristiky na 115 mA dostaneme hodnotu napětí 1.897 V a dosazením do (2)

$$\eta(115 \text{ mW}) = 0.23\%.$$

Přesnost výrobcem uvedeného kalibračního vztahu jsou slabé tři platné cifry a účinnost proto uvádíme na dvě platné číslice.

Diskuse výsledků

Naměřená voltampérová charakteristika odpovídá klasické diodě. Světelná charakteristika je mnohem monotónější, než jsme očekávali. Přechod do laserové oblasti je velmi nevýrazný, což je zčásti kvůli tomu, že jsme v ní mohli naměřit pouze několik bodů, abychom se vešli do povoleného maximálního proudu. Zjištěný prahový proud je nezanedbatelně ovlivněn volbou oblastí, ve kterých jsme charakteristiku prokládali přímkami.

Spektra se velmi hrubě chovají dle očekávání, tedy při zvyšujícím se proudu jsou posilovány především vlnové délky u určité užší oblasti. Tato oblast nicméně nemá jasně čitelný střed. Určené maximum je nevýrazné a další ještě méně výrazné maximum nastává asi o 5 nm dále. Celkově můžeme říct, že jsme pravděpodobně proměřili spíše nelaserovou oblast funkce diody a přechod k laserové oblasti, čistě laserové chování by ale nastalo až při vyšších proudech.

K proměření spekter jsme nastavili širší štěrbinu monochromátoru, aby se difrakcí rozmyla modová struktura spekter. Naopak pro měření této struktury musela být štěrbina mnohem užší. Výsledné grafy ukazují, že difrakce funguje dle očekávání.

Závěr

Naměřili jsme voltampérovou a světelnou charakteristiku laserové diody. Výsledky jsou na Obrázcích 1 a 2. Stanovili jsme prahový proud

$$i_0 = (96 \pm 2) \text{ mW}.$$

Pomocí spektrálních čar rtuti v Tabulce 2 jsme nakalibrovali lineární stupnici používaného monochromátoru. Změřili jsme spektra laseru při několika vlnových délkách. Výsledky jsou v Obrázku 3. Určili jsme stimulovanou vlnovou délku

$$\lambda_{\max} = 813.0 \pm 0.1 \text{ nm}$$

a diskutovali změny ve spektrech.

Na Obrázku 4 je naměřená modová struktura spektra, z níž jsme určili délku aktivní oblasti rezonátoru

$$L = (239 \pm 5) \mu\text{m}.$$

Pro proud 115 mA jsme určili výkonovou účinnost

$$\eta = 0.23\%.$$

Reference

- [1] *Studijní texty Praktika III* [online]. <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>.