

## 1 Pracovní úkoly

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.
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.

## 2 Teoretický úvod

Teorie se zakládá na textech [1] a [2].

Prochází-li proud mezi dvěma polovodiči přes PN přechod, pak může například docházet k emisi žiarenia. Pokud je tento přechod umístěn ve světelném rezonátoru a prochází-li jím dostatečně silný proud, větší než prahový proud  $i_0$ , dochází ke stimulované emisi fotonů. Uvnitř rezonátoru vzniká stojaté vlnění, což způsobuje to, že vyzařované světlo má maxima s roztečí

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

kde  $\lambda$  je vlnová délka vyzařovaného světla,  $L$  je délka rezonátoru a  $N_g$  je grupový index lomu uvnitř rezonátoru (který je definován vztahem  $v_g = c/N_g$ , kde  $v_g$  je grupová rychlost šíření světla a  $c$  je rychlost světla ve vakuu).

Účinnost laseru je definovaná jako

$$\eta = \frac{\phi_c}{UI}, \quad (2)$$

kde  $\phi_c$  je vyzařovaný výkon laserem,  $U$  je napětí na diodě a  $I$  je proud, který skrz ni teče.

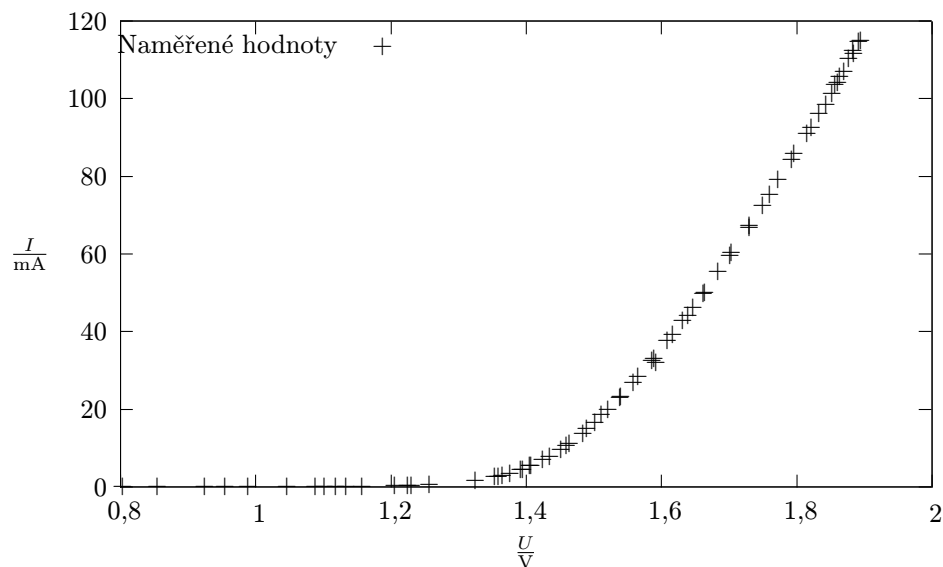
## 3 Měření

### 3.1 Měření VA a světelné charakteristiky laseru

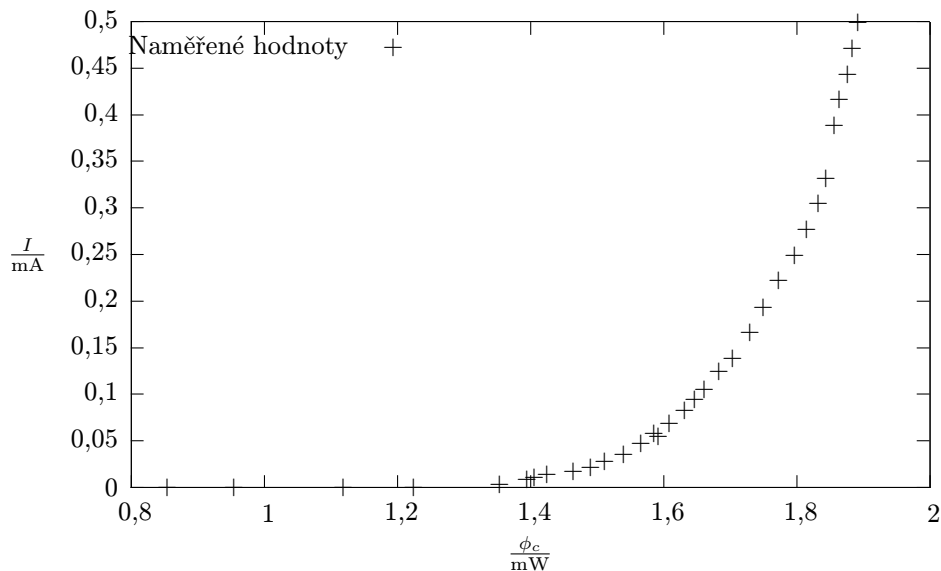
Změřil jsem jak VA charakteristiku, tak světelnou charakteristiku laseru (VA charakteristiku jsem změřil dvakrát - proto má zhruba dvojnásobný počet naměřených bodů v grafu a v tabulce). Naměřené hodnoty jsou v tabulce č. 1. Pro výpočet vyzařovaného výkonu z naměřených hodnot odpovídajících osvětlení fotocitlivé součástky (fotodiody) byl využit předpoklad lineární odezvy fotodiody a také informace od výrobce laseru, že při 115 mA je výkon 500 mW. Graficky znázorněná VA charakteristika je v grafu 1 a světelná charakteristika je v grafu 2.

Tabulka 1: Naměřená VA a světelná charakteristika diody

$U/V$	$I/mA$	$\phi_c/mW$	$U/V$	$I/mA$	$\phi_c/mW$	$U/V$	$I/mA$	$U/V$	$I/mA$
0,855	0,001	0,000	1,647	46,2	0,094	0,804	0,000	1,484	13,92
0,955	0,004	0,000	1,662	49,9	0,105	0,925	0,002	1,502	16,71
1,119	0,080	0,000	1,684	55,5	0,125	0,989	0,007	1,521	19,90
1,225	0,445	0,000	1,704	60,5	0,139	1,047	0,021	1,539	23,1
1,354	2,60	0,003	1,730	67,4	0,166	1,089	0,046	1,559	27,0
1,395	4,65	0,009	1,750	72,6	0,194	1,102	0,060	1,589	33,1
1,406	5,40	0,011	1,773	79,2	0,222	1,134	0,102	1,617	39,2
1,425	7,03	0,014	1,797	85,8	0,249	1,158	0,156	1,639	44,1
1,464	11,28	0,017	1,815	91,1	0,277	1,206	0,332	1,664	50,1
1,490	14,99	0,022	1,833	96,2	0,305	1,231	0,476	1,702	59,7
1,512	18,55	0,028	1,844	98,6	0,332	1,257	0,69	1,730	67,0
1,540	23,4	0,036	1,857	103,7	0,388	1,325	1,70	1,761	75,4
1,566	28,5	0,047	1,864	105,7	0,416	1,359	2,80	1,793	84,3
1,592	32,0	0,055	1,877	110,2	0,443	1,365	3,00	1,822	92,5
1,586	32,6	0,058	1,884	112,5	0,471	1,376	3,53	1,852	101,3
1,609	37,7	0,069	1,892	114,7	0,499	1,392	4,38	1,861	104,2
1,632	42,8	0,083				1,408	5,50	1,870	107,0
						1,435	7,85	1,885	111,6
						1,452	9,72	1,895	114,9
						1,460	10,73		



Obrázek 1: Graf VA charakteristiky laseru



Obrázek 2: Graf světelné charakteristiky laseru

### 3.2 Určení prahového proudu $i_0$

Určování prahového proudu je do jisté míry subjektivní. Prokládal jsem světelnou charakteristiku v oblasti vyšších hodnot napětí. Odhady pro  $i_0$  v závislosti na počtu (posledních) bodů, které byly proloženy v závislosti zářivého výkonu na procházejícím proudu jsou v tabulce 2. Je vidět, že se hodnoty relativně dost liší - zejména v případě proložení posledních tří bodů, které by měly nejlépe odpovídat oblasti, kde dochází k laserování. Z těchto dat by vycházela hodnota prahového proudu na

$$i_0 = (65 \pm 5) \text{ mA},$$

ale to příliš neodpovídá následným měřením, protože např. v oblasti kolem 80 mA není ve spektrech ani stopy po laserování.

Tabulka 2: Určování hodnoty  $i_0$ 

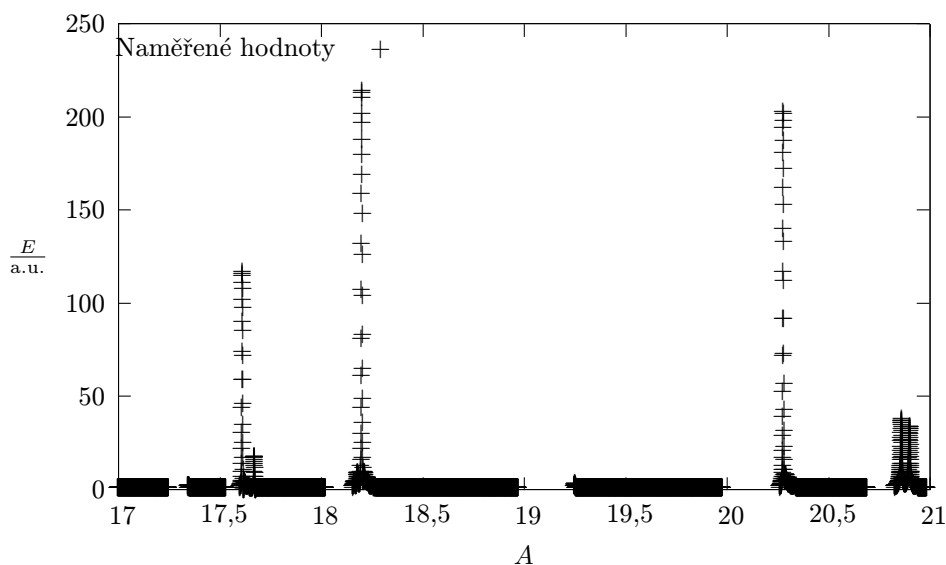
#	$i_0/\text{mA}$
3	74
4	61
5	62
6	65
7	66
8	63

### 3.3 Kalibrace monochromátoru

Pro kalibraci byla využita rtuťová výbojka se známým spektrem. Sice kalibrace probíhala v jiné oblasti, než pak probíhalo měření laseru, ale v případě, že kalibrace může být považována za lineární v širším úseku, pak můžeme kalibraci extrapolovat i na námi žádanou oblast. Spektrální čáry Hg výbojky jsou uvedeny v tabulce 3. Kalibrace byla provedena pomocí 6-ti spektrálních

Tabulka 3: Spektrální čáry Hg výbojky

barva	$\lambda/\text{nm}$	$A$
fialová	404,7	17,613
fialová	407,8	17,672
(modrá)	433,9	
(modrá)	434,8	
modrá	435,9	18,202
zelená	546,1	20,279
žlutá	577,0	20,862
žlutá	579,1	20,901



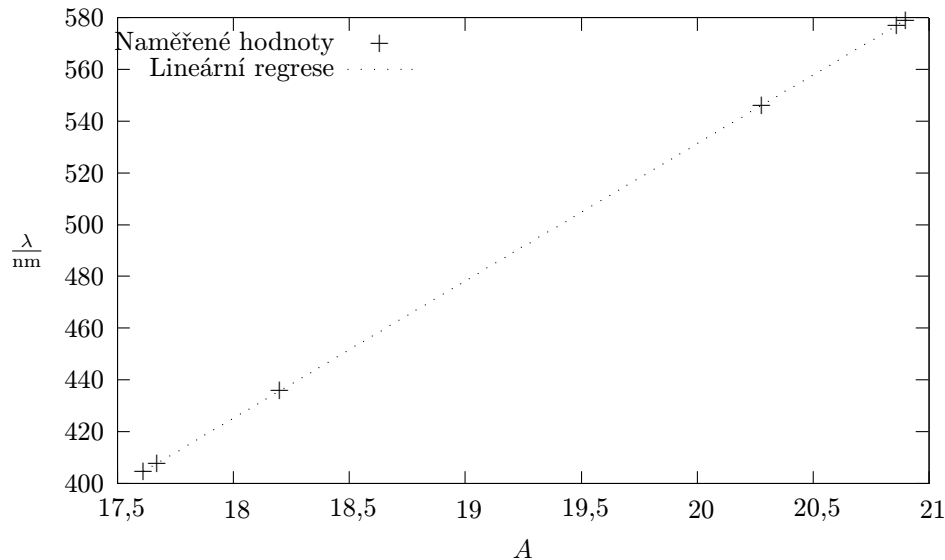
Obrázek 3: Spektrum Hg výbojky využité na kalibraci přístroje

čar nacházejících se v rozmezí 400 nm a 600 nm (dvě slabší, co jsou uvedené v tabulce v závorce nebyly uvažovány, protože jsou opravdu velice slabé ve srovnání s blízkou čarou, která je zrovna v našem intervalu nejsilnější). V téže tabulce je ve sloupečku označeném  $A$  odpovídající poloha monochromátoru. Hodnoty  $A$  u čar byly určeny proložení Gaussovou funkcí. Kalibrace je (proložení a grafické znázornění je v grafu č. 4)

$$\frac{\lambda}{\text{nm}} = 50,05A - 529,7.$$

### 3.4 Měření spekter laseru pro různé hodnoty proudu

Pro 7 různých hodnot proudu v intervalu mezi 80 mA a 118 mA byla naměřena spektra, která za pomoci kalibrace z předchozího bodu byla graficky zpracována do grafu 5. Nejsou zde vykresleny jednotlivé body, ale jsou vyhlazena beziérovými křivkami (tvar spekter je dobře zachován, ale v grafu nepřekáží kolik značky jednotlivých bodů a je potlačen šum a případné náznaky modové struktury, která by ovšem neměla být v těchto měřeních stejně patrná). Je vidět, že při zvyšování proudu (napětí) se blížíme oblasti, kde má laser laserovat. Ve skutečnosti ovšem vidíme, že ještě



Obrázek 4: Kalibrace stupnice monochromátoru

nelaseruje úplně dobře ani na nejvyšší hodnotě proudu - v grafu nevystupuje jedna oblast vlnových délek zas tak příliš ostře, jak je naznačeno v [2].

### 3.5 Modová struktura spektra laseru

Posledním měřením spektra bylo modové spektrum. Pro toto měření bylo potřeba zvýšit zesílení signálu, protože bylo potřeba použít užší štěrbinu monochromátoru, aby bylo možné rozeznat změny světelné intenzity na relativně jemné škále. Přivřením štěrbiny monochromátoru se ovšem snížil světelný zisk - proto bylo potřeba silnější zesílení. Modové spektrum bylo změněno při proudu 118 mA. Maximální intenzita vyzařování laseru leží podle grafu u vlnové délky  $\lambda = (814,7 \pm 1,0)$  nm. Šířku modové struktury jsem z grafu určil jako  $(0,31 \pm 0,01)$  nm (na 10 nm je přibližně 32,5 maxim intenzity). Grupový index lomu v aktivním prostředí laseru je dle [2]  $N_g = 4,5$ . Z toho můžeme určit délku rezonátoru

$$L = \frac{\lambda^2}{2 \Delta \lambda N_g} = (240 \pm 8) \mu\text{m}.$$

### 3.6 Účinnost laseru

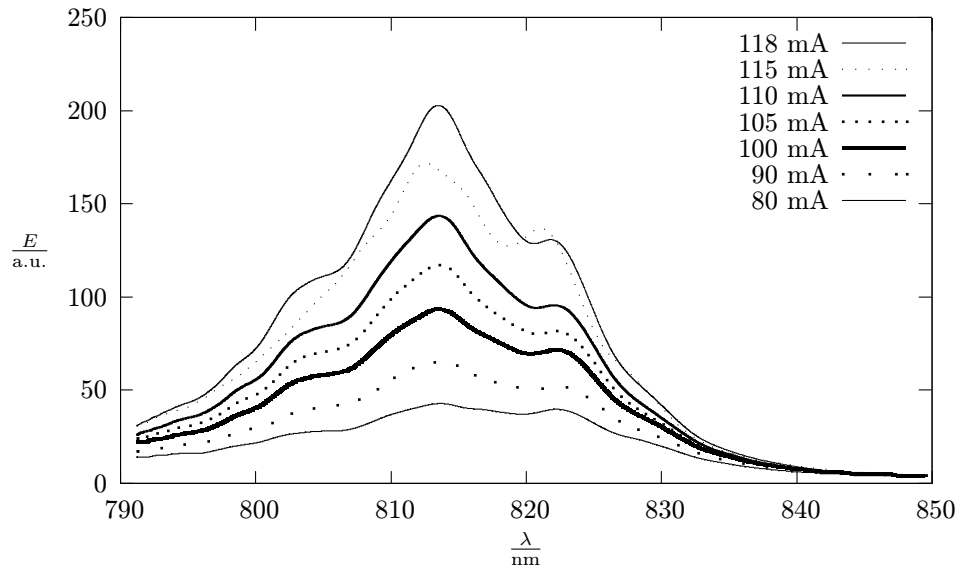
Účinnost laseru při nejvyšší hodnotě proudu jím procházející dle rovnice (1) je

$$\eta_{115 \text{ mA}} = 0,23\%.$$

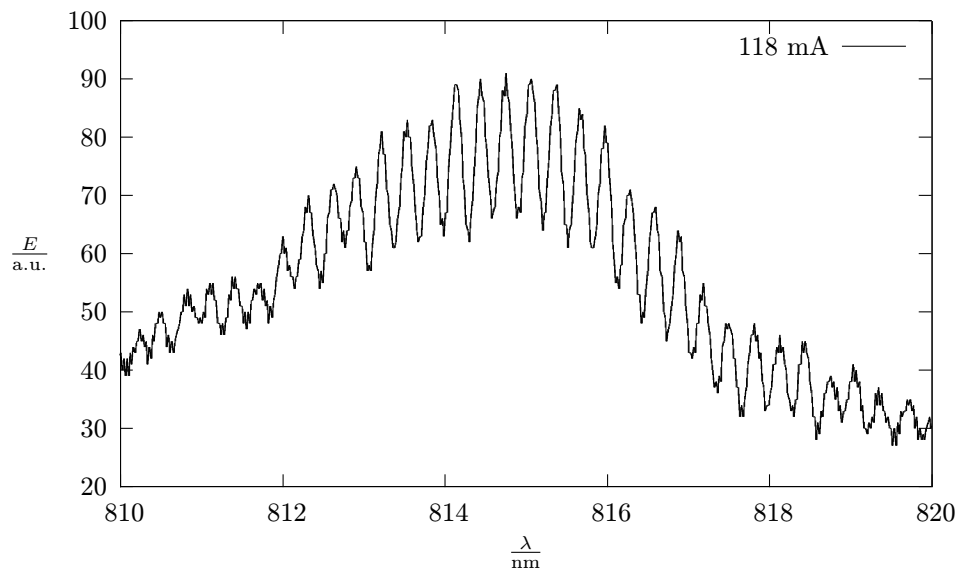
To je také nejvyšší účinnost, které laser v oblasti, ve které byla měření VA charakteristika, dosahuje.

## 4 Diskuse

Chyby a chybové úsečky u měření VA charakteristiky jsem neudával, protože chyby se pohybují na poslední udané cifře (max. by měly být v hodnotě dvou nejmenších jednotek) a jsou tak relativně nízké a v grafu by chybové úsečky nebyly ani patrné. U určování světelného výkonu mohla být



Obrázek 5: Tvary spekter pro různé hodnoty proudů procházejících laserem



Obrázek 6: Modové spektrum laseru

chyba trochu vyšší protože odečítání probíhalo na ručkovém galvanometru a docházelo ke změně rozsahů, ale ani zde by neměla být chyba příliš velká.

Prahové napětí bylo nejspíše (dle dalších měření spekter) určeno chybně, což považuji hlavně za důsledek toho, že v oblasti, kterou jsem mohl proměřovat, aniž bych překročil limitní hodnotu proudu, teprve začínala v laseru ve větší míře probíhat stimulovaná emise a prokládal jsem body, kdy k ní ještě nedocházelo. Proto také byla hodnota prahového napětí podhodnocena.

V průběhu měření VA i světelné charakteristiky se mohla projevit teplotní závislost VA charakteristiky laseru, ale vzhledem k tomu, že jsem se snažil při měření počkat vždy do chvíle, než se hodnota na měřících přístrojích ustálila, tak by se tento fakt neměl v měření příliš projevit.

Kalibrace byla provedena v jiném rozsahu vlnových délek, než bylo prováděno následné měření. To by mohlo vést k chybě, protože extrapolace bývají nejisté. Na druhou stranu proložení šesti vlnových délek rtuťové výbojky bylo takřka dokonale lineární a můžeme tedy čekat, že se i v naší měřené oblasti bude chovat podobně.

Šířka štěrbinu monochromátoru ovlivňuje zejména dvě věci. Jednak to, kolik světla projde monochromátorem a pak to, z jak širokého úseku monochromátor vybírá frekvence (bere vlastně úsek frekvencí). Podle měření, které se chystáme podniknout, musíme správně nastavit štěrbinu. Pokud chceme mít vysoké rozlišení, pak musíme štěrbinu nastavit na užší, ale tím ztrácíme světelnost a buď je posléze potřeba použít vyšší zesílení měřeného světla nebo je potřeba z dané oblasti sbírat světlo delší dobu (což program v praktiku neumožňoval, ale tímto způsobem funguje měření spekter hvězd). Pokud nám naopak nejde o vysoké spektrální rozlišení, tak můžeme štěrbinu nastavit jako širší a pak máme vyšší světelnost.

## 5 Závěr

Změřil jsem voltampérovou i světelnou charakteristiku laseru a obě jsem graficky znázornil. Prahový proud byl na základě naměřené světelné charakteristiky laseru určen jako

$$i_0 = (65 \pm 5) \text{ mA}.$$

Provedl jsem kalibraci stupnice monochromátoru a určil, že je

$$\frac{\lambda}{\text{nm}} = 50,05A - 529,7,$$

kde  $A$  je díle stupnice monochromátoru.

Naměřil jsem spektra laseru pro různé hodnoty proudu a naměřil jsem také modovou strukturu laserového záření pro jednu hodnotu proudu. Z modové struktury jsem určil délku laserového rezonátoru jako

$$L = (240 \pm 8) \mu\text{m}.$$

Určil jsem hodnotu účinnosti laseru pro hodnotu proudu 115 mA jako

$$\eta_{115 \text{ mA}} = 0,23\%.$$

## 6 Literatura

- [1] **Studijní text k fyzikálnímu praktiku:** Kvantová optika a optoelektronika  
[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt\\_305.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_305.pdf)
- [2] **Pokyny k měření úlohy fyzikálního praktika:** Studium polovodičového GaAs/GaAlAs laseru  
[http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni\\_315.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni_315.pdf)