Martin Beránek, 2.F, X–11

Úloha 15 – Studium GaAs/GaAlAs laseru

Pracovní úkol:

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.

Teorie: Pracovní oblastí polovodičového laseru je PN přechod. Je potřeba, aby Fermiho hladina byla ve valenčním (resp. vodivostním) pásu. Tím vznikne na přechodu po přiložení vnějšího napětí inverzní populace hladin. Dále je přechod součástí krystalu, jehož čela (tedy rozhraní polovodič–vzduch) mají dobrou odrazivost a tvoří tedy rezonátor potřebný k fungování laseru.

Při nízkém přiloženém napětí se laser chová obdobně jako polovodičová svítivá dioda a teprve při překročení určité hodnoty napětí (resp. prahového proudu i_0) dojde ke vzniku inverzní populace hladin a přechod se začne chovat jako laser – tj. podstatně se zvýší produkovaný zářivý tok a zúží se spektrum záření.

K měření frekvenčního spektra laseru je použit monochromátor s optickou mřížkou. Na optickou mřížku dopadá vstupní paprsek, který se na mřížce ohne podle vlnových délek. Úzkou výstupní štěrbinou se pak vybírá určitá část spektra a měří se tok, který touto výstupní štěrbinou prochází. Monochromátor má lineární stupnici, která ale není zkalibrována, takže je třeba provést nejprve kalibraci zdrojem se známým spektrem – v tomto případě byla použita Hg výbojka.

Nastavováním šířky výstupní štěrbiny monochromátoru je možné určit, z jak široké části spektra se bude měřit zářivý tok. Zúžením štěrbiny lze získat spektrum s více detaily, které se při širší štěrbině „zprůměrují“.

Vzhledem k tomu, že laser generuje záření získané mnohonásobným odrazem v rezonátoru, jsou ve spektru nejvíce zesíleny vlnové délky, které v rezonátoru konstruktivně interferují. Pro frekvenční vzdálenost jednotlivých maxim pak podle [2] platí

$$\Delta\nu = \frac{c}{2LN_\mathrm{g}}\,, \tag{1}$$

kde N_g je grupový index lomu aktivní oblasti a L délka rezonátoru.

K měření optického výkonu laseru byla použita fotodioda 1PP 75 a k ní připojený galvanometr MG 5. Proud naměřený galvanometrem je s dostatečnou přesností přímo úměrný toku dopadajícímu na fotodiodu (jak jsem mimo jiné ověřil při měření úlohy 5). K úloze byla dodána absolutní hodnota světelného výkonu laseru při proudu 115 mA, takže na jejím základě mohu spočítat absolutní hodnoty výkonu i pro další hodnoty proudu laserem.

Měření: Voltampérovou charakteristiku jsem měřil s voltmetrem zapojeným paralelně přímo k laserové diodě. Toto zapojení je vhodné, protože odpor diody je vůči voltmetru velmi malý. Zářivý tok Φ jsem určil na základě údajů galvanometru připojenému k fotodiodě 1PP 75. Vnitřní odpor galvanometru je pro základní rozsah 50 Ω a pro vyšší rozsahy 500 Ω. Paralelně k jeho svorkám byl ještě připojen odpor 220 Ω (maximální hodnota, kterou může galvanometr měřit je 5000 dílků, takže, jak je vidět z tabulky 1, pokud by tento odpor nebyl připojen, překročí proud generovaný fotodiodou rozsah přístroje). Vzhledem k tomuto zapojení není možné počítat, že proud generovaný fotodiodou (a tedy i zářivý tok vycházející z laseru) je přímo úměrný výchylce galvanometru. Hodnoty výchylky G je třeba přepočítat podle Ohmova zákona a vztahů pro paralelní spojování odporů. Pak získám hodnotu, která již je úměrná zářivému toku a podle údaje o absolutní hodnotě toku při proudu laserem 115 mA, který činí 0,5 mW, mohu určit absolutní hodnotu Φ pro všechny proudy.

Ze zjištěného napětí a proudu laserovou diodou mohu také určit její příkon P. Účinnost laseru η je pak dána poměrem zářivého výkonu ku příkonu laseru.

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Graf 1 zobrazuje voltampérovou charakteristiku laseru. V grafu 2 je závislost zářivého výkonu na proudu tekoucím diodou. Chybu výkonu jsem určil jako polovinu dílku stupnice galvanometru, protože nemám k dispozici jiný přesnější údaj. Graf 8 pak ukazuje závislost účinnosti na procházejícím proudu.

U [V]	I [mA]	P [mW]	G [dílk.]	Φ [mW]	η [%]
0,800	0,0	0,0	0	0,0000	0,00
1,142	0,1	0,1	0	0,0000	0,00
1,221	0,4	0,5	0,5	0,0001	0,01
1,267	0,8	1,0	1	0,0001	0,01
1,298	1,2	1,6	3	0,0003	0,03
1,325	1,8	2,4	5,5	0,0006	0,04
1,337	2,1	2,8	7,5	0,0009	0,04
1,353	2,6	3,5	11	0,0013	0,05
1,369	3,2	4,4	16	0,0019	0,06
1,383	3,9	5,4	21,5	0,0025	0,06
1,398	4,8	6,7	30,5	0,0035	0,07
1,410	5,6	7,9	38,5	0,0045	0,08
1,417	6,3	8,9	45	0,0052	0,08
1,422	6,7	9,5	49	0,0057	0,08
1,442	8,6	12,4	30	0,0083	0,10
1,454	10,0	14,5	40	0,011	0,11
1,484	14,0	20,8	60	0,017	0,12
1,512	18,4	27,8	80	0,022	0,12
1,537	22,8	35,0	100	0,028	0,12
1,563	27,8	43,5	130	0,036	0,13
1,591	33,6	53,5	165	0,046	0,14
1,631	42,6	69,5	230	0,064	0,15
1,690	56,9	96,2	360	0,100	0,18
1,716	63,9	109,7	440	0,122	0,19
1,765	77,2	136,3	600	0,167	0,22
1,808	89,5	161,8	820	0,228	0,25
1,854	103,7	192,3	1250	0,347	0,33
1,874	113,3	212,3	1670	0,464	0,41
1,878	115,0	216,0	1800	0,500	0,43

Tabulka 1 – voltampérová a světelná charakteristika laseru

Dále jsme měřil spektrální charakteristiky laserové diody. K tomu je potřeba nejprve zkalibrovat monochromátor. V grafu 3 je vidět získané spektrum světla Hg výbojky. Maxima odpovídající jednotlivým čarám ve spektru jsou popsána vlnovými délkami příslušných čar (podle [1], str. 114). Úzké maximum u hodnoty 18,5 neodpovídá žádné čáře ve spektru a předpokládám, že je způsobeno náhodným vybuzením fotonásobiče. Tomu odpovídá i to, že oproti ostatním není „rozmazané“ do větší spektrální šířky.

x (dílků)	17,60571	17,66481	18,19222	20,26568	20,84702	20,88690
λ [nm]	404,7	407,8	435,8	546,1	577,0	579,0

Tabulka 2 – kalibrace monochromátoru

V tabulce 2 jsou vypsána jednotlivá maxima v dílkách stupnice monochromátoru a ve vlnových délkách. Lineární regresí pak získám kalibrační vztah

$$\lambda\,[\mathrm{nm}] = (53{,}15 \pm 0{,}02)x - (531{,}1 \pm 0{,}3)\,, \tag{2}$$

Chyba je statistickou chybou lineární regrese a proložení maxim je zobrazeno v grafu 4.

Na základě vztahu (2) teď mohu proměřit spektrální charakteristiku laseru s absolutními hodnotami vlnových délek. Měřil jsem s výstupní štěrbinou monochromátoru nastavenou na šířku 0,4 mm pro čtyři různé hodnoty proudu monochromátorem. Po změně proudu jsem nastavení aparatury nijak neměnil, pouze pro dva nižší proudy jsem desetkrát zvýšil zesílení. Touto změnu zesílení jsem ale před vynesení do grafu příslušná data vydělil, takže relativní intenzita jednotlivých spekter je ve správném poměru.

Naměřená data jsou v grafu 5. Je vidět, že při rostoucím proudu laserem se zesiluje úzký rozsah vlnových délek na kterých laser svítí. Maximum se s rostoucím proudem posouvá mírně k delším vlnovým délkám a pro proud 115 mA leží přibližně na hodnotě $\lambda_{\max} = (819 \pm 1)$ nm.

Při dalším měření jsem zmenšil šířku výstupní štěrbiny na 0,06 mm. Tím získám větší spektrální rozlišení monochromátoru a tedy i možnost pozorovat modovou strukturu spektra. Naměřená data pro proud laserem 115 mA jsou v grafu 6. Vzhledem k nízké vzorkovací frekvenci záznamu mohou být intenzity minim a maxim zkreslené ovšem není problém odečíst příslušné vlnové délky a určit jim odpovídající frekvence. Hodnoty pro několik vybraných jsou v tabulce 3.

max. č.	ν [THz]	max. č.	ν [THz]
1	367,27	10	366,02
2	367,12	11	365,88
3	366,98	12	365,74
4	366,84	13	365,60
5	366,70	14	365,46
6	366,58	15	365,32
7	366,44	16	365,18
8	366,30	17	365,04
9	366,16	18	364,90

Tabulka 3 – mody laseru

Lineární regresí pak získám vzdálenost maxim $\Delta\nu = (139{,}1 \pm 0{,}2)$ GHz. Maxima a jimi proložená přímka je v grafu 7. Podle [2] je grupový index lomu aktivní oblasti $N_{\mathrm{g}} = 4{,}5$, takže mohu pomocí vztahu (1) určit délku rezonátoru, která vychází $L = (0{,}239 \pm 0{,}003)$ mm.

Diskuze: Z grafu světelné charakteristiky laseru (graf 2) je vidět, že lineární část odpovídající překročení prahového proudu leží převážně nad měřenými hodnotami proudů. K proložení přímky nemám dostatek údajů, takže mohu jen odhadovat, že prahový proud bude ležet poblíž maximálního proudu, který jsme měřil. Přesněji lze na hodnotu tohoto proudu usuzovat z grafu 5. Podle teorie se má po překročení prahového proudu změnit spektrum laseru tak, že je podstatně zesílen úzký rozsah vlnových délek. Je vidět, že spektrum pro proud 115 mA tuto vlastnost jasně má a naopak ve spektru při proudu 90 mA není vidět žádné podstatné zesílení určitých vlnových délek. Ze tvaru spekter pak usuzuji, že platí $i_0 = (105 \pm 10)$ mA. Přesnější hodnotu by bylo možné získat proměřením světelné charakteristiky pro vyšší proudy, ale to nebylo u úlohy umožněno.

Při měření modové struktury spektra laseru je potřeba zvolit šířku štěrbiny tak, aby její spektrální šířka byla nižší, než rozdíl vlnových délek jednotlivých modů. Na druhou stranu je vhodné volit šířku dostatečně velkou vzhledem k vzorkovací frekvenci měřící aparatury. Vzdálenost jednotlivých modů je přibližně 0,3 nm a vzdálenost dvou zaznamenaných vzorků 0,04 nm, takže je vidět, že je možné zvolit šířku tak, aby byly intervaly mezi vzorky dostatečně pokryty a zároveň nezanikla modová struktura. U pokynů k úloze byla doporučena šířka štěrbiny 0,06 mm, která pro měření vyhovuje, takže jsem žádné další úpravy neprováděl.

Z grafu účinnosti laseru (graf 8) je v první řadě vidět nárůst účinnosti při malých proudech, který odpovídá nárůstu zářivé rekombinace oproti nezářivé stejně jako u obyčejné svítivé diody. K dalšímu nárůstu dochází až při vyšších proudech. Tento odpovídá vzniku inverzní populace hladin a tedy oblasti, kde se dioda začíná chovat jako laser.

Závěr: Změřil jsem voltampérovou a světelnou charakteristiku laserové diody (viz grafy 1 a 2). Vzhledem k malému rozsahu měřených proudů jsme pouze odhadl prahový proud na $i_0 = (105 \pm 10)$ mA.

Zkalibroval jsme monochromátor a změřil spektra laserové diody pro čtyři různé čerpací proudy (graf 5). Tvar naměřených spekter odpovídá očekávaným změnám v závislosti na proudu. Dále jsme při větším spektrálním rozlišení změřil modovou strukturu. Teoretický předpoklad konstantní frekvenční vzdálenosti jednotlivých maxim je dobře splněn (viz graf 7) a délku rezonátoru jsme z toho určil na $L = (0{,}239 \pm 0{,}003)$ mm.

Na základě jedné udané absolutní hodnoty světelného výkonu laseru a podle předpokladu linearity fotodiody zapojené v hradlovém režimu jsem určil závislost účinnosti laseru na čerpacím proudu (viz graf 8). Tvar grafu odpovídá očekávanému chování laserové diody.

Literatura:

[1] I. Pelant, J. Fiala, J. Fänhrich, J. Pospíšil: Fyzikální praktikum III. – Optika, Karolinum, Praha 1993
[2] elektronické texty k úlohám praktika