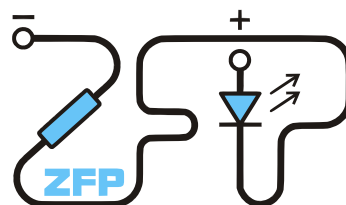


Krabinet  výuky obecné fyziky,
UK MFF

Fyzikální praktikum III



Optika



Úloha č. 15

Název úlohy: Studium polovodičového laseru

Jméno: Josef Iosephus Kučera

Datum měření: 16.03.2022



Připomínky opravujícího:



Chybí úkol 5 + v textu

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	2
Výsledky a zpracování měření	0–9	6
Diskuse výsledků	0–4	3
Závěr	0–1	1
Použitá literatura	0–1	1
Celkem	max. 17	13

Posuzoval: **Procházka**

dne: **31.3.2022**

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. Diskutujte, proč je volena velmi úzká štěrbina monochromátoru.
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. Při jedné nadprahové hodnotě proudu laserem změřte emisní spektrum polovodičového laseru při různých teplotách laseru. Vyhodnoťte teplotní závislost vlnové délky stimulované emise a výstupního výkonu.
5. Určete výkonovou účinnost laseru pro vybranou hodnotu proudu v nadprahové oblasti.

Základní vztahy a klíčová slova:

pásová energetická struktura polovodiče, PN (NP) přechod, závěrný (propustný) směr, injekce PN (NP) přechodu, spontánní a stimulovaná emise, rezonátor, modová struktura záření

Theorie

Úvod

Nejprve si vůbec zpravme, uctivý mistře, jehož jméno Marek Procházka jest, co jest to vůbec ten bazmek, an zove se **polovodičový laser**. Možná to již víte, ale musím vás o tom poučiti též sám a verbatim, jinak bych dostal po hubě od auktorit praktika.

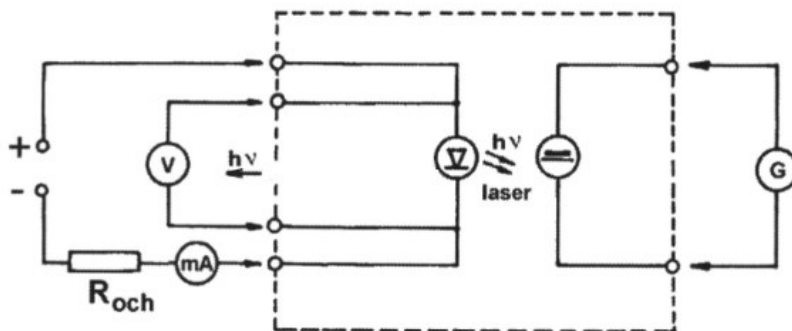
Zkratka LASER, neplést se slovem LŮZER, ukrývá v sobě anglické *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

„*Voco de, móre?*” (jak se tak lidově cigánsky ptá) LEJZR jest pro nás významný zdroj elektromagnetického zářeníčka, protože nám toliko umožňujet vytvořiti koherentní, polarisované a monochromatické světlo. „*A to se vyplatí, Horste! Zavolejte nyní na 158 a ukradneme pro Vás 1+1 laser z praktik III gratis.*”

„*Co je to za černou magii, voe?*” (zeptal by se lajk) Nikoliv černá magie, ale stimulovaná emise elektronů, toť náš pachatel! V tubě laserové nejprve musíme docílití tzv. inverzní populace energetických hladin elektronů v atomcích, např. dodáváním energie čerpáním biopaliv, nebo podáním malé dávky metamfetaminu, aby se nám elektronové nepředávkovali.

V polovodičových LA SER ech probíhá čerpání elektrickým proudem procházejícím P-N přechodem v prospustném směru (taky v tom nepropustném bychom tam nenarvali ani prd). A pak v takto napjaté atmosphaře stačí jediný zbloudilý elektron, který shodí všechny své soudruhy, a všichni popadají do nižších hladin hříšných jak bouchoře, za vyzáření elektromagnetického vlnění ve stejný moment o stejné energii (a tedy i stejné vlnové délce).

Zesílení záření vznikléhož stimulovanou emisí zajišťuje krystal vybroušený kolmo na P-N přechod (viz Obr.1).




Obr.1: Schaema obvodu s LASERem, přejato z [1]

Při nízkých proudech předpokládáme pozorování převážně pouze spontánní emise a tedy spektrum bude podobné LEDu a poměrně široké a nudné a nezajímavé.

Jiná situace nastane při dosažení prahového proudu i_0 , kdy v LEDu začne převládat stimulovaná emise a vyzářované spektrum se zlejšrovatí do úzkého hrbíku při jedné vlnové délce. A jsme doma, dětičky.

„Nojo, ciwe, ale jag to posnáž?” (řekli by v Opráscích) Přejchod přes Praha-ový proud se projeví značným nárůstem světelného toku. Závislost světelného toku na proudu je nad prahovou hodnotou proudu lineární [1], takže se těšte, budeme opět dělat lineární regraci.

A nebylo by to to správné praktikum , kdyby v něm nebyla alespoň jedna rovnička v theorii. Výkonovou účinnost LASERu definujeme jako [1]:

$$\eta = \frac{\phi_e}{P} \quad (1)$$

kde $P = U \cdot i$ jest příkon lejrzu a ϕ_e světelný tok

A jak se ten lejzr měří? Světlo z lejrzové diody dopadá na vstupní šterbinu monochromátora. Tam se pomocí mřížky záření rozloží (jako matfyzák u zkoušek) na spektrum a po průchodu výstupní šterbinou dopadne světlo na fotonásobitch a vytvoří vytvoří výstupní signál. Tento signál zpracovává počítač.

Výsledky měření

Nejprve jali jsme se měřiti voltampérovou a světelnou charakteristiku LASERu. Narozdíl od středověké úlohy 5, kde toť měřiti nešlo simutánně, zde jsme mohli měřiti obé naráz, což student velice ocenil.

Napětí U jsme měřili digitálním voltmetrem na rozsahu 2 V a proud i jsme měřili ampérmetrem na rozsazích 2 mA , 20 mA , 200 mA a galvanometrem jsme pak měřili proud tekoucí diodou I_ϕ . Naměřená data uvádíme v tabulce (1).

U [V]	$\pm\epsilon U$ [V]	i [mA]	$\pm\epsilon i$ [mA]	I_ϕ [μA]	$\pm\epsilon I_\phi$ [μA]
0,00	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
0,25	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
0,50	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
0,75	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
1,00	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
1,15	0,01	0,00	0,01	0,0	0,1
1,49	0,01	1,03	0,01	0,0	0,1
1,52	0,01	1,90	0,01	0,1	0,1
1,55	0,01	2,92	0,01	0,4	0,1
1,59	0,01	5,38	0,01	1,3	0,1
1,61	0,01	7,03	0,01	2,1	0,1
1,63	0,01	9,03	0,01	3,4	0,1
1,65	0,01	10,09	0,01	4,8	0,1
1,65	0,01	11,34	0,01	35,5	0,1
1,66	0,01	11,98	0,01	73,1	0,1
1,66	0,01	12,98	0,01	133,3	0,1
1,67	0,01	13,97	0,01	193,1	0,1
1,67	0,01	14,84	0,01	244,7	0,1
1,68	0,01	15,93	0,01	310,7	0,1
1,68	0,01	16,84	0,01	363,5	0,1
1,69	0,01	18,07	0,01	438,3	0,1
1,70	0,01	19,13	0,01	500,5	0,1
1,70	0,01	20,06	0,01	555,6	0,1
1,71	0,01	21,03	0,01	611,3	0,1
1,71	0,01	22,08	0,01	669,5	0,1
1,71	0,01	22,98	0,01	717,6	0,1

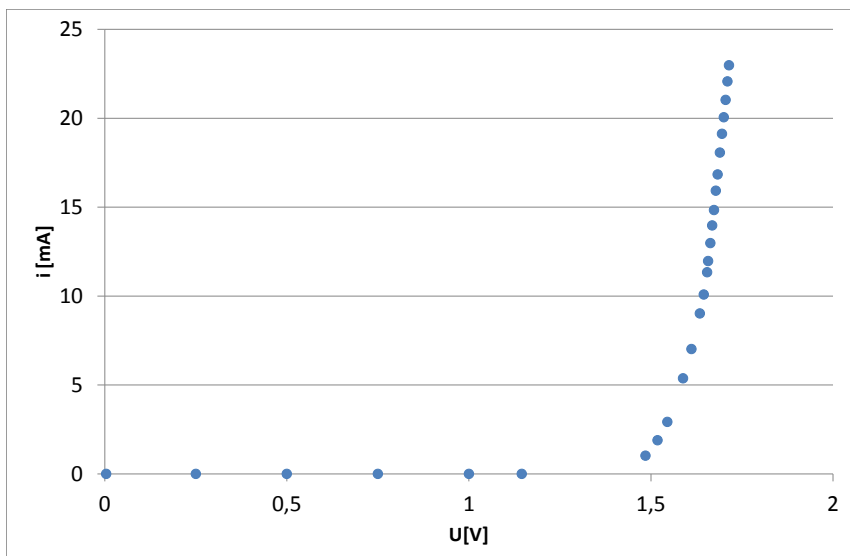
Tabulka 1: Naměřená data na praktiku

Popis tabulky by měl obsahovat o jaká naměřená data se jedná a měl by být nad tabulkou.

Kde jsme chybu ϵU , ϵi a ϵI_ϕ určili jako chybu poslední číslice po zaokrouhlení na pěkný ciferný řád, abychom byli z oblga.

Data z tabulky (1) jsme vynesli do Grafu 1

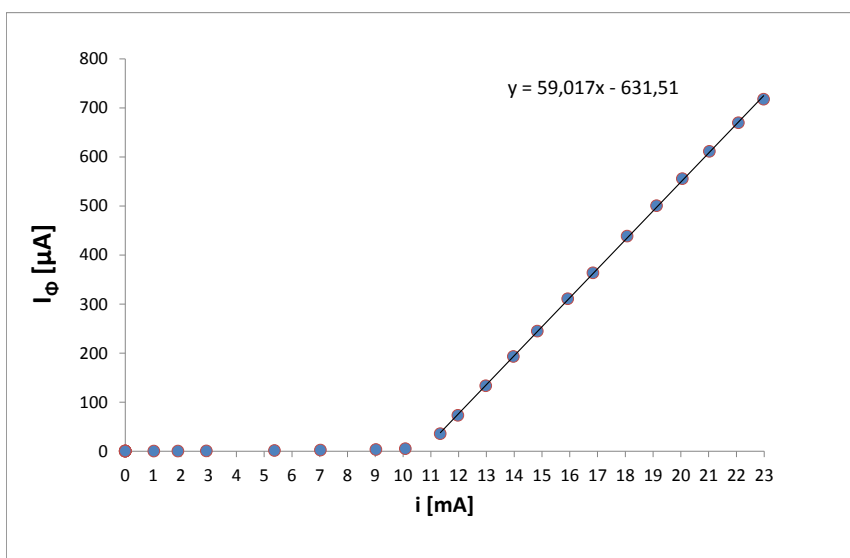
Graf 1: Voltampérová charakteristika ležru



Naměřené body by bylo dobré proložit vhodnou křivkou

A rovnou si zde uvedeme i jeden pomocný Graf 2, který dává do vztahu proud I_ϕ s i pomocí kterého se dá extrapolovat nulový proud i_0 :

Graf 2: Závislost proudu na proudu s fitem lineární části

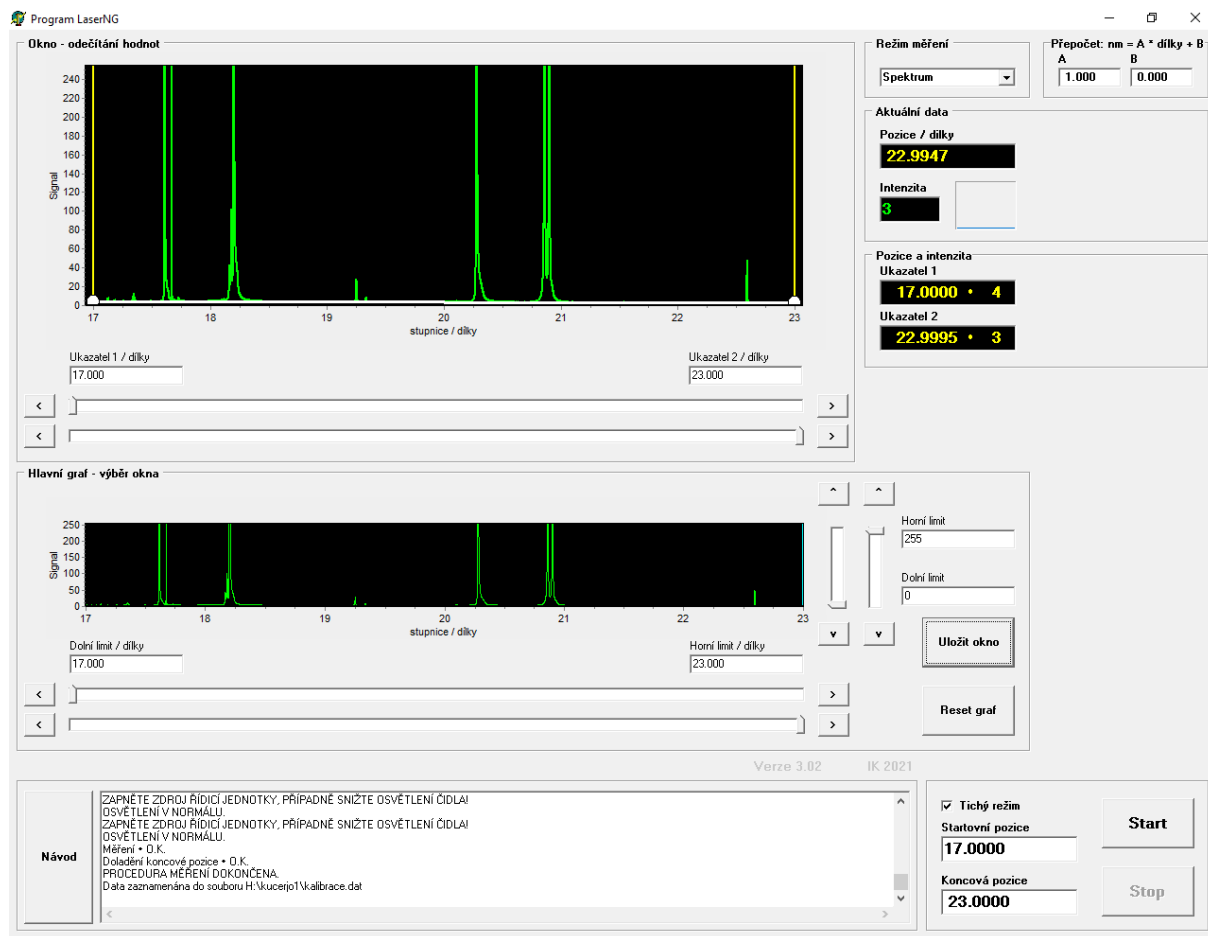


Kde snadno určíme průsečík osy x alias hledané i_0 jako:

$$i_0 = \frac{631,51}{59,017} = (10,7 \pm 0,1) \text{ mA}$$

kde chybu jsme lehce nadhodnotili z fyzikální podstaty nejistoty fitu, protože očekáváme, že bod zlomu bude zaoblený.

Pak jsem se vrhnul na kalibraci monochromátoru:



Obr. 2: Naměřené kalibrační hodnoty

Z naměřených dat jsme v programu Origin identifikovali posice vrcholů hrbíků a ze známých spektrálních čar Hg výbojky jsme určili převod mezi dílky stupnice a vlnovým spektrem:

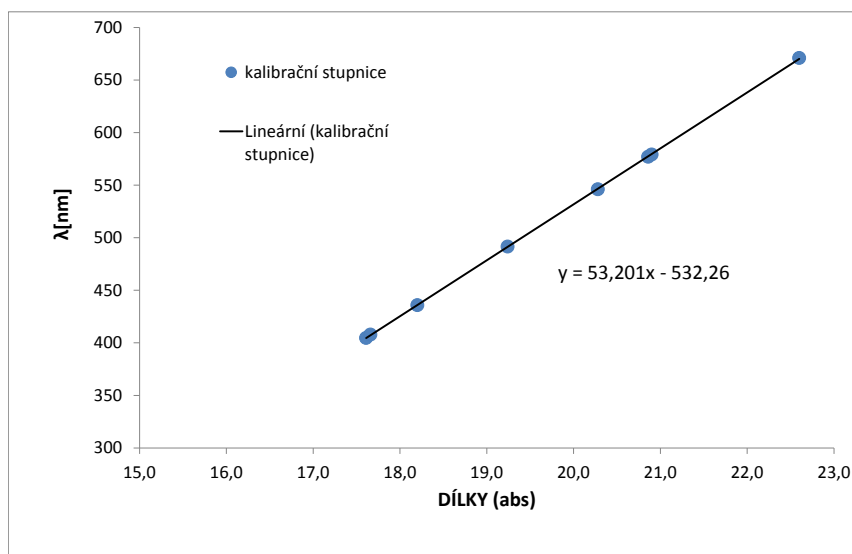
DÍLKY (abs)	\pm (abs)	λ [nm]
17,61	0,01	404,7
17,66	0,01	407,8
18,20	0,01	435,8
19,24	0,01	491,6
20,28	0,01	546,1
20,86	0,01	577,0
20,90	0,01	579,1
22,60	0,01	671,0

Tabulka 2: Důležité kalibrační hodnoty

Tyto hodnoty jsme pak vynesli do grafu 3 (na další straně), abychom ověřili lineárním fitem, že opravdu odpovídají.

Graf 3: Voltampérová charakteristika lezru

popis obrázků/grafů by měl být pod nimi.



Vůbec se nedivíme, že nám vyšel tak přesný fit, protože jsme přiřazovali známé hodnoty λ , které před námi naměřili jiní mo(u)dří pánové a dámové, takže jsme dostali přesný lineární fitík.

Výstupní štěrbinu monochromátoru byla zvolena jako 0,04 mm. Proč jsme zvolili tak úzkou štěrbinu monochromátoru? No protože Hg výbojka měla veliký světelný výkon, takže nám často hodnoty přetékały, proto jsme potřebovali snížit intenzitu signálu. **důvodem je i lepší spektrální rozlišení**
Kalibrační rovnice vypadá následovně:

$$\lambda = C(\text{DÍLKŮ}) + D \quad (2)$$

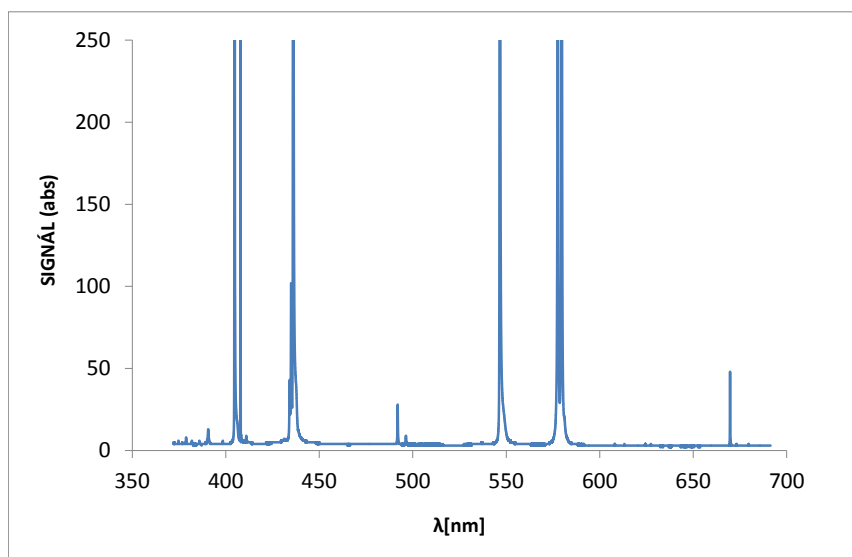
Kde z lineární regrese:

$$C = (53,20 \pm 0,01) \text{ nm/dílek}$$

$$D = (-532,26 \pm 0,01) \text{ nm}$$

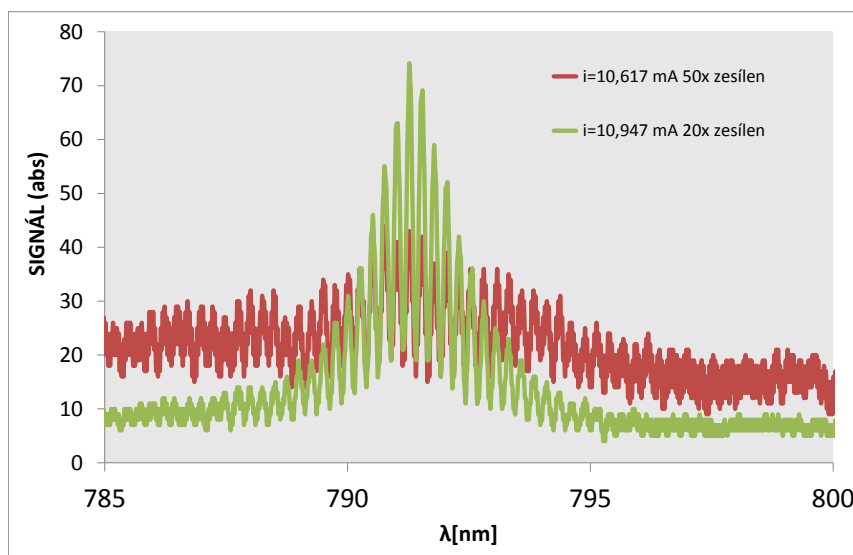
Po této kalibraci mohli jsme vynést v graf 4 spektrum hg výbojky:

Graf 4: Spektrum hg výbojky



Tak a teď k vrcholu programu, proměřování LASERu! Pro šěrbinu otevřenou na 0,08 mm nejprve uvádíme v Grafu 5 signální výtěžek pro jednu těsně podprahovou a jednu těsně nadprahovou hodnotu napájecího proudu i : **pište signál nebo spektrum, ne signální výtěžek**

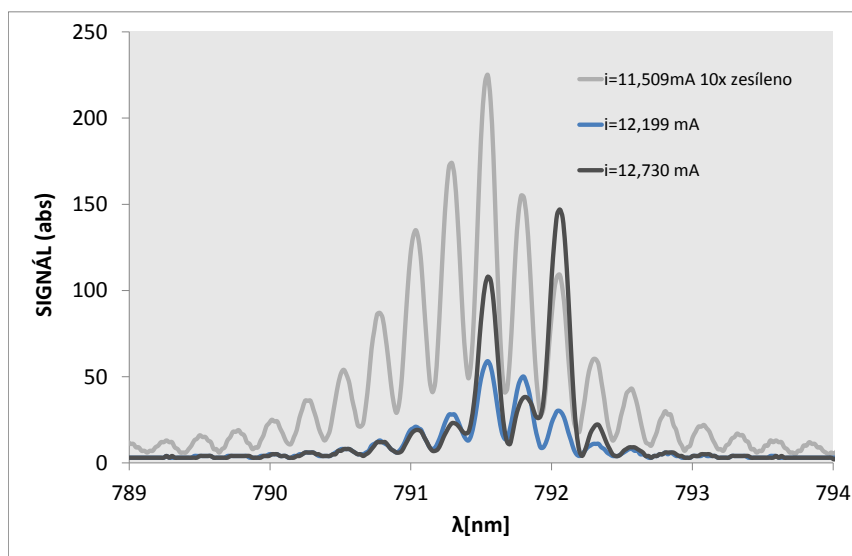
Graf 5: Podprahový a lehce nadprahový průběh signálu



Vidíme, že pod prahem jest maximum velice neostré, ale stále jest tam, mistře!

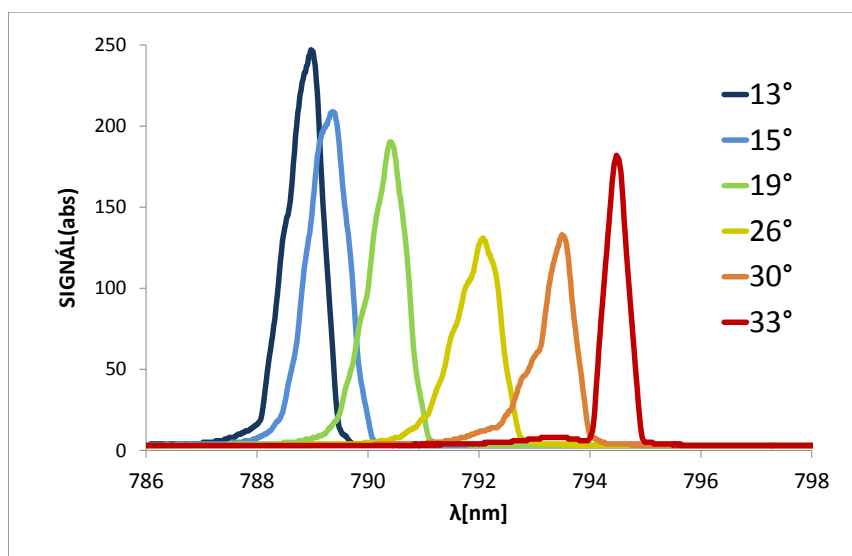
Dále uvádíme ještě 3 nadprahové průběhy signálu:

Graf 6: 3 zcela nadprahové průběhy signálu



A na konec, otevřeli jsme štěrbinu ještě více na $0,15 \text{ mm}$ a vypočítali jsme následující barevný graf pro potěchu oka týkající se teplotních vlastností polovodičového laseru pro pevnou hodnotu napájecího proudu $i = (15,00 \pm 0,01) \text{ mA}$:

Graf 7: Emisní spektrum polovodičového laseru pro teploty 13 – 33°



A vidíme jasný trend, totiž, že maximum signálu laseru se posouvá pro nižší teploty do nižších vlnových délek. Čím to vysvětlíme? Tím, že vodiče lépe vedou, takže laser má možnost přeměnit více elektrické energie na vyšší frekvenci (a tedy i energii) elektromagnetického záření.

Pro pokojovou teplotu 26° má laser maximum signálu na vlnové délce $\lambda_{max} = (792,0 \pm 0,1) \text{ nm}$

Diskuze

Štěrbiny.

Bylo nám řečeno, že nemáme zapomenouti na uvedení velikosti štěrbin pro jednotlivá měření. Tam byla jistá variabilita, především v intenzitě signálu. Rtuťová výbojka měla velkou intenzitu, takže jsme museli štěrbinu hodně přiškrtit na $0,04\text{ mm}$, jinak nám neustále přetékala data. **výhodou je i lepší spektrální rozlišení**

Laser neměl takovou svítivost, takže tam jsme museli naopak štěrbinu otevřít na $0,08\text{ mm}$ pro měření signálové intenzity pro různý napájecí proud i .

Nejvíce jsme ji otevřeli pro teplotní měření na plných $0,15\text{ mm}$.

Chybové úsečky.

Měli jsme tolik dat, že jsme neuváděli chybové úsečky a často ani tabulky, data jsme vynášeli rovnou do grafů, jinak bychom se z toho zbláznili.

Chyby přístrojů.

Přístroje se tvářily, že měří poměrně přesně, ale chyba byla větší než, to jako správní fyzici jsme se nenechali uchlácholiti jejich hezkými ciframi. Svět není dokonalý, jsme s tím smířeni. **větší než co? Popsat přesněji.**

Závěr

Voltampérová i světelná charakteristika mají předvídaný průběh, rozuměj: nejprve roste exponenciálně a pak se růst linearisuje.

Prahový proud jsme určili jako

$$i_0 = (10,7 \pm 0,1) \text{ mA}$$

Okalibrovali jsme stupnici monochromátorku skrze nalezení specifických hodnot, lineární re-grací skrz ně a dopočítáním převodního vztahu dle (2).

Uzřeli jsme, že na podprahové hodnotě napájecího proudu $i < i_0$ výtěžek stejně jako ostrost maxima signálu z laseru rychle klesá, ale není nenulový.

Prokoukli jsme též to, že pro rostoucí teplotu LASERU posouvá se vlnová délka maxima λ_{max} do vyšších hodnot, což vysvětlujeme vyššími ztrátami ve vodičích a tedy nižší účinností laseru.

Pro (vyhřátou) pokojovou teplotu 26° odečetli jsme vlnovou délku maxima laseru jako

$$\lambda_{max} = (792,0 \pm 0,1) \text{ nm}$$

A toť pro dnešek vše, lidičky!

Reference

- [1] Studijní text k Fyzikálnímu Praktiku III. 15. Studium polovodičového laseru. [online] [cit. 2022-03-20]. Dostupné online z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_315.pdf