

UNIVERZITA KARLOVA

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM III.
PRO OBOR OBECNÁ FYZIKA

**XV. Štúdium
polovodičového laseru**

Autor:
Samuel Kočiščák

14. marca 2017

1 Pracovné úlohy

1. Spracujte súčasne svetelnú aj voltampérovú charakteristiku meraného laseru. Namerané závislosti spracujte graficky. Stanovte prahový prúd i_0 .
2. Pomocou Hg výbojky okalibruje stupnicu monochromátora SPM 2. Diskutujte, prečo je volená veľmi úzka štrbina monochromátora.
3. Zmerajte emisné spektrum polovodičového laseru pri niekoľkých hodnotách prúdu laserom pod a nad odhadnutou prahovou hodnotou i_0 . Určte vlnovú dĺžku stimulovanej emisie a kvalitatívne diskutujte zmeny v spektre sprevádzajúce zmenu napájacieho prúdu.
4. Pri jednej nadprahovej hodnote prúdu laserom zmerajte emisné spektrum pri rôznych teplotách laseru. Vyhodnoďte teplotnú závislosť vlnovej dĺžky stimulovanej emisie a výstupného výkonu.
5. Určte výkonovú účinnosť laseru pre vybranú hodnotu prúdu v nadprahovej oblasti.

2 Teoretická časť

2.1 Polovodiče

Podľa vodivosti a závislosti vodivosti na teplote rozlišujeme^[1] 3 druhy materiálov: *izolanty, polovodiče a kovy*. V kovoch, na rozdiel od izolantov a čistých (jednoduchých) polovodičov, je bez akejkoľvek stimulácie časť elektrónov vo *vodivostnom pásme*, teda v energetickom stave, v ktorom sú veľmi slabo viazané ku kryštálovej mriežke a môžu sa ľahko pohybovať - viezť prúd. Nevodiče sú charakteristické tým, že energia, ktorú je potrebné udeliť elektrónom, aby sa odpútali z valenčných väzieb na atómy a mohli viezť prúd je veľmi veľká (typicky väčšia, než $SI3eV$). Polovodiče majú elektróny viazané slabšie, teda stačí menej energie (typicky 1 eV), aby elektrón prešiel z valenčného do vodivostného pásma. Túto energiu možno získať napríklad z tepla udeleného polovodiču alebo prostredníctvom dopadajúceho svetla. Preto sú polovodiče vďačný materiál na výrobu na svetlo alebo teplo citlivých súčiastok.

Prímesové polovodiče vznikajú zabudovaním elektricky aktívnych atómov do mriežky čistého polovodiča. Ak do mriežky vhodne husto vložíme viacväzbový atóm (v porovnaní s väzbovosťou materiálu pôvodného polovodiča), niekoľko (typicky 1) elektrónov nebude naviazaných na žiadny iný atóm, tieto elektróny sú k mriežke viazané oveľa slabšie, než ostatné a môžu viezť elektrický prúd. Takémuto polovodiču hovoríme *polovodič typu N* a hovoríme, že *majoritnými nosičmi* náboja v ňom sú elektróny. Ak do mriežky, naopak, vložíme atóm s nižšou väzbovosťou, jednému zo susediacich atómov pôvodného polovodiča bude chýbať do plného obsadenia jeden elektrón od nového vloženého prvku. Táto vzniknutá *diera* bude ľahko zaplniteľná valenčným elektrónom inej blízkej väzby, čím sa môže diera premiestňovať a viezť elektrický prúd. Takýto polovodič nazývame *polovodič typu P* a majoritnými nosičmi náboja v ňom sú diery.

2.2 P-N prechod

P-N prechod vzniká, keď spolu v jednom monokryštáli susedia polovodiče typu P a typu N a takýto prechod má zaujímavé fyzikálne vlastnosti. Jednou z nich je anizotropná vodivosť – P-N prechod vedie elektrický prúd dobre v smere od P do N, ale veľmi zle v smere od N do P, preto je vhodný na výrobu diódy - súčiastky, ktorá vedie prúd len jedným smerom.

2.3 LED

LED (z anglického *light-emitting diode*) je polovodičová dióda, ktorá (ak je na zdroj napätia pripojená v priepustnom smere) vyžaruje svetlo. Keď ňou tečie prúd, do oblasti P sa dostávajú elektróny a do oblasti N diery. Pri rekombinácii s majoritnými nosičmi náboja dochádza k vyžiareniu svetla, ktorého energia zodpovedá energii potrebnej na uvoľnenie elektrónu z valenčného do vodivostného pásma.

2.4 Fotodióda

Fotodióda je polovodičový prvok, ktorý využíva tzv. *fotovoltický jav* na P-N prechode a funguje ako zdroj elektrického prúdu. Keď svetlo vhodnej vlnovej dĺžky dopadne na rozhranie P-N, odovzdá svoju energiu elektrónu, ktorý je týmto excitovaný do vodivostného pásma a vzniká pár: neviazaný elektrón a diera. Tieto sú silným elektrickým poľom na P-N rozhraní separované a odtláčané na opačné strany P-N prechodu, čo má za následok prúd tečúci fotodiódou a to aj bez priloženého vonakjšieho napätia.

2.5 Fotonásobič

Najcitlivejším detektorom svetla je *fotonásobič*. Jedná sa o vákuovú elektrónku, ktorá pozostáva z katódy, na ktorú dopadajú fotóny, veľkého množstva geometricky vhodne rozmiestnených elektród s postupne sa zvyšujúcim potenciálom a anódy. Pri dopade fotónu na katódu je uvoľnený jeden elektrón, ktorý je silným elektrickým poľom medzi elektródami urýchľovaný k prvej elektróde medzi katódou a anódou, na ktorú narazí a uvoľní niekoľko elektrónov. Tie sú poľom urýchlené k ďalšej elektróde (s vyšším potenciálom), na ktorú narazia a vyrazia vyšší počet elektrónov, než koľko ich narazilo. Mnohými urýchleniami a nárazmi na elektródy vznikne makroskopické množstvo elektrónov letiacich smerom k anóde. Pri interakcii s jediným fotónom teda fotonásobičom pretečie makroskopický prúd, ktorý je možné detekovať. Intenzitou poľa medzi jednotlivými elektródami možno nastaviť citlivosť fotonásobiča a v čase kvantitatívne vyhodnocovať intenzitu veľmi slabého žiarenia.

2.6 Laser

Laser je odlišný od konvenčných zdrojov svetla tým, že generuje monochromatické koherentné svetlo. Využíva stimulovanú emisiu fotónov z excitovaných elektrónov, pri ktorej je emitovaný fotón rovnakej vlnovej dĺžky a s rovnakou fázou, ako fotón, ktorý emisiu stimuloval. Na to je samozrejme potrebný zdroj svetla, ktorý lavínovitý proces začne. Okrem stimulovanej emisie prebieha v látke aj spontánna emisia, ktorá

môže byť zdrojom potrebného počítocného fotónu. Spoločne s procesom stimulovanej emisie však prebieha proces absorpcie svetla elektrónmi a ich následnej excitácie. Podľa [St] je teda nutné zabezpečiť, aby v látke, ktorá má byť zdrojom laseru, bol väčší počet excitovaných, než relaxovaných elektrónov. Ak je táto požiadavka splnená, môže dôjsť k stimulovanej emisii.

Aby sa intenzita vychádzajúceho žiarenia ešte zvýšila, umiestňuje sa aktívne prostredie do rezonátora, napríklad do *Fabry-Perrotovho* rezonátora, ktorý môže mať jedno zrkalo čiastočne priehľadné a generovať kontinuálny prúd svetla, alebo môžu byť obe nepriehľadné a uvoľňovať svetlo po dávkach, taký laser nazývame *pulzný*.

Keďže je jasné, že pri stimulovanej emisii sa relaxujú excitované elektróny, je zjavne nutné dodávať relaxovaným elektrónom energiu a excitovať ich. Tomuto procesu sa vraví čerpanie a je možné ho realizovať viacerými spôsobmi.

2.7 Polovodičový laser

Polovodičový laser je čerpaný cez P-N prechod tečúcim prúdom v priepustnom smere, ktorý vnáša elektróny do polovodiča typu P a diery do polovodiča typu N. Skôr, ako by spontánne rekombinovali s majoritnými nosičmi prúdu rekombinujú stimulovane - pod vplyvom okolitého žiarenia. Fabry-Perrotov rezonátor je konštruovaný zo samotnej diódy, ktorá má prednú a zadnú stenu rovnobežnú a vybrúsenú dojemna.

Ak je čerpanie slabé (prúd diódou nízky), funguje toto usporiadanie len ako obyčajná LED, keďže energia sa uvoľňuje spontánnou emisiou a teda v náhodnom smere a s náhodnou fázou. Pri istom prúde pretekajúcom diódou, nazvime tento prúd medzným prúdom a označme ho i_0 , je populácia excitovaných elektrónov dostatočná na to, aby bol v rezonátore udržaný koherentný lúč. Pri prúde vyššom, ako i_0 funguje laserová dióda naozaj ako laser.

2.8 Meranie monochromátorom

Monochromátor je zariadenie, ktoré pomocou disperzného prvku rozkladá lúč svetla na jednotlivé zložky a umožňuje tak merať závislosť intenzity svetla na frekvencii. Ako disperzný prvok môže byť použitý napríklad hranol alebo difrakčná mriežka. Monochromátor má na vstupe otvor, cez ktorý doň preniká študované svetlo, láme sa na disperznom prvku a časť z neho (úzky obor frekvencií) sa odrazí do pevne umiestneného fotonásobiča. Plynulou zmenou geometrie sústavy možno premerať závislosť intenzity na frekvencii. Najjednoduchšie je možné meniť geometriu otáčaním disperzného prvku. Monochromátor je potrebné pre každý disperzný prvok nakalibrovať – priradiť jednotlivým uhlom natočenia zodpovedajúce frekvencie svetla.

2.9 Žiarivosť

Fyzikálnu veličinu *žiarivosť*, značenú J definujeme vzťahom

$$\frac{dP}{d\Omega}, \quad (1)$$

kde dP je žiarením zdroja prenesený výkon prislúchajúci infinitezimálnemu priestorovému uhlu $d\Omega$. Definujme aj spektrálnu hustotu žiarivosti $j = f(\lambda)$ vzťahom

$$j(\lambda) = \frac{dJ}{d\lambda}(\lambda) \Leftrightarrow J = \int_{\text{spektrum}} j d\lambda, \quad (2)$$

kde λ je istá skúmaná vlnová dĺžka.

2.10 Výkonová účinnosť

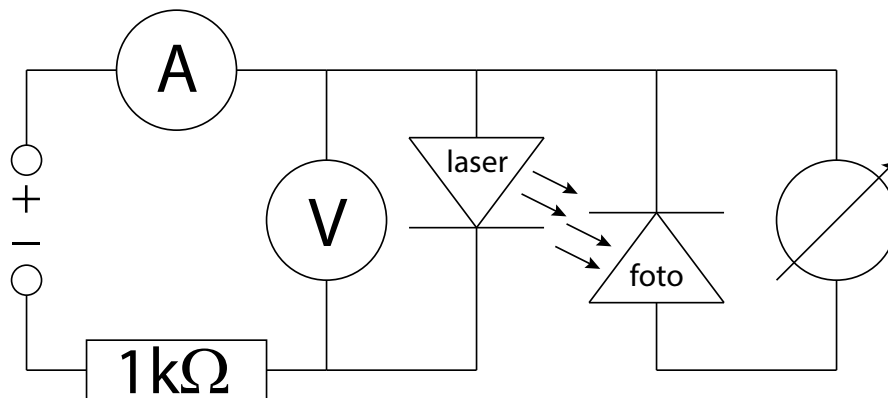
Bezrozmernú veličinu značenú η zavedenú predpisom:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (3)$$

kde P_{out} je výstupný výkon a P_{in} je príkon nazývame *výkonovou účinnosťou*.

3 Výsledky merania

Meranie prebehlo v priestoroch Základného fyzikálneho praktika, pri teplote (určenej teplomerom na dióde pred tým, ako bola zapnutá) približne 22°C . Pri meraní sme použili laserovú diódu *ADL-65102TL* s maximálnym operačným prúdom 23 mA v zapojení podľa obrázka 1.



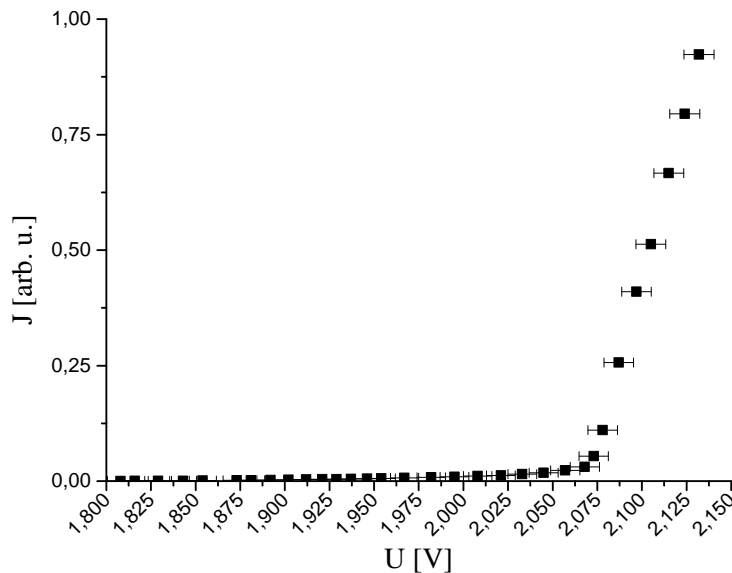
Obr. 1: Schéma zapojenia laserovej diódy s fotodiódou

Fotodióda je inštalovaná v blízkosti laserovej diódy a možno ňou určiť svetelnú charakteristiku diódy pomocou galvanometra pripojeného priamo na fotodiódu. Použitý voltmeter bol *UNI-T UT803^[UT]*, ampérmeter *RFT G-1002.500^[RFT]* a galvanometer *Metra MG5*. Pri meraní spektra laseru sme použili monochromátor *SPM 2* s nainštalovanou transmisnou difrakčnou mriežkou neznámej hustoty vrypov.

Pri všetkých meraniach sme volili šírku štrbiny $30\ \mu\text{m}$. K tejto voľbe sa vrátíme v diskusii.

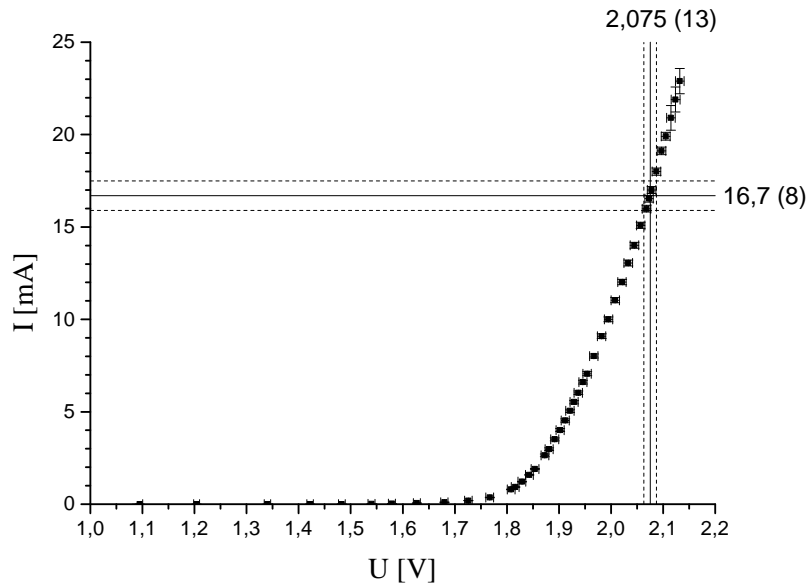
3.1 Svetelná a voltampérová charakteristika lasera

Voltampérovú a svetelnú charakteristiku lasera sme merali v zapojení podľa obrázka 1. Na stabilizovanom zdroji sme postupne zvyšovali napätie a odčítali sme hodnoty napätia na voltmetri, prúdu ampérmetrom a prúdu galvanometrom. Všetky namerané dáta sú v prílohe, tu uvádzame iba grafy nameraných závislostí žiarivosti $J = f(U)$ a prúdu $I = f(U)$ na napätí s vyznačenou chybou dopočítanou podľa [UT] a [RFT]. Nepresnosť galvanometra sme zanedbali, vrátíme sa k nemu v diskusii.



Obr. 2: Graf závislosti žiarivosti lasera na napätí

Graf žiarivosti lasera na napätí (graf na obrázku 2) má žiarivosť vynesenu iba v arbitrárnej jednotke, k tomu sa vrátíme v diskusii. Je z neho však možné pomerne jednoznačne určiť napätie u_0 , pri ktorom začína prevládať stimulovaná emisia na spontánnou, teda napätie, pri ktorom diódou tečie medzný prúd i_0 . Toto napätie odhadujeme na $u_0 = 2,075(13)$ V (nepresnosť veľkosti jedného dielika na grafe, zhruba veľkosť chybovej úsečky). S pomocou voltampérovej charakteristiky možno tomuto napätiu priradiť medzný prúd.



Obr. 3: Voltampérová charakteristika laserovej diódy

Z voltampérovej charakteristiky (graf na obrázku 3) a znalosti u_0 odhadujeme medzný prúd na $i_0 = 16,7(8)$ mA.

3.2 Kalibrácia monochromátora

Monochromátor sme okalibrovali určením polôh spektrálnych čiar ortuľovej výbojky. Celý experiment sme ridili cez počítač, s použitím softvéru *Štúdium GaAs/GaAlAs laseru*^[Np], ktorý umožňuje skenovať intenzitu žiarenia dopadajúceho na fotonásobič cez interval uhlov natočenia difrakčnej mriežky α (v arbitrárnych jednotkách – dielikoch) a po kalibrácii aj cez interval vlnových dĺžok λ . Polohy spektrálnych čiar ortuti sú zapísané v tabuľke 1.

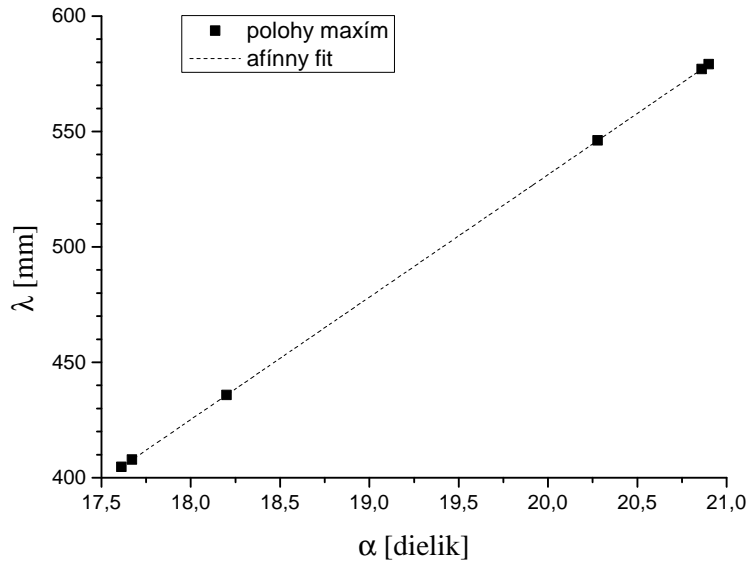
Tabuľka 1: Čiarové spektrum ortuťovej výbojky

farba	orientačná relatívna intenzita	λ [nm]	α [dielik]
červená	1	690,7	–
červená	0,8	671,6	–
červená	0,8	623,4	–
červená	0,3	612,3	–
červená	0,5	607,3	–
žltá*	10	579,1	20,9007
žltá*	2	577,0	20,8611
zelená*	20	546,1	20,2786
modrozelená	0,5	491,6	–
modrá*	5	435,8	18,2009
modrá	0,5	434,8	–
modrá	0,2	433,9	–
fialová*	1,5	407,8	17,6716
fialová*	3	404,7	17,6121

Podľa odporúčania v [Pm] sme premeriavali osvetlenie fotonásobiča cez interval α 16,4 až 22 dielikov stupnice monochormátora. Čiary, ktoré sme pozorovali, sú v tabuľke 1 označené hviezdíčkou a je pri nich napísaná nameraná hodnota α , ktorú sme určili ako uhol, pod ktorým bolo vidno špičku hrotu zodpovedajúceho čiare spektra vo frekvenčnej charakteristike hustoty žiarivosti j . Predpokladali sme závislosť

$$\lambda = p\alpha + q, \quad (4)$$

ktorou sme preložili namerané body $\lambda = f(\alpha)$ z tabuľky 1. Tieto preložené body možno vidieť v grafe na obrázku 4.



Obr. 4: Kalibračné meranie spektra ortuťovej výbojky

Ako z grafu na obrázku 4 vidno, afínny fit podľa vzťahu 4 sedí veľmi dobre. Parametre fitu aj s nepresnosťou určenia sú zapísané v tabuľke 2.

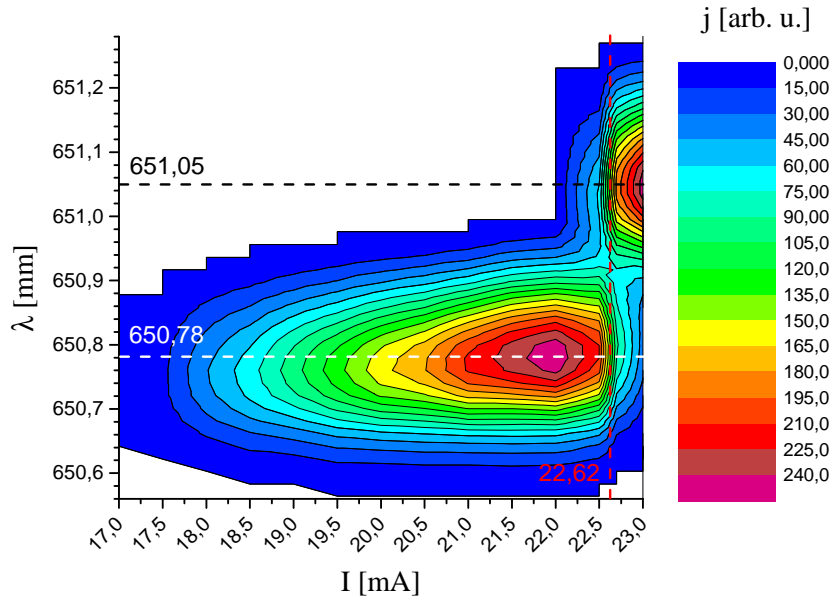
Tabuľka 2: Hodnoty kalibračných koeficientov experimentu

	p [nmdielik ⁻¹]	q [nm]
hodnota	53,05	-529,6
neistota	0,01	0,3

Hodnoty z tabuľky 2 sme zadali do softvéru podľa [Np].

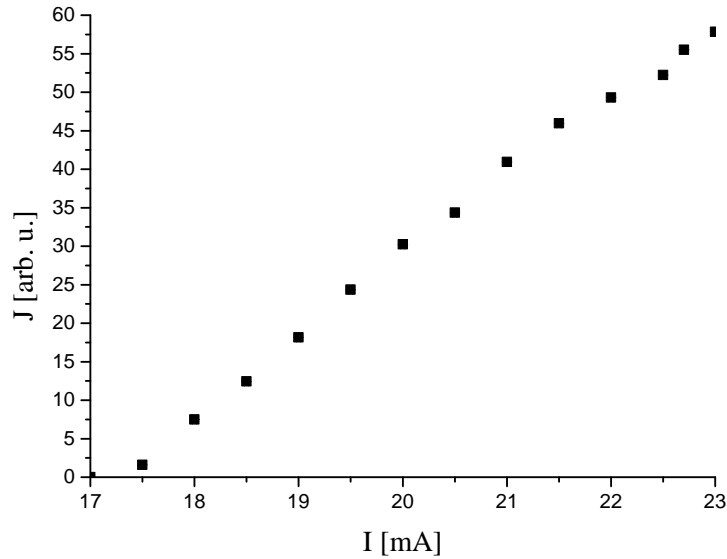
3.3 Prúdová závislosť emisného spektra laserovej diódy

Pomocou softvéru *Studium GaAs/GaAlAs laseru* sme za nastavenia prúdu na stabilizovanom zdroji a jeho určenia pomocou ampérmetra^[RFT] premerali frekvenčnú charakteristiku hustoty žiarivosti j laserovej diódy. Namerané dáta neprikladáme, kvôli ich rozsahu, ale merali sme j v bodoch $I \times \lambda$ na sieti 14×73 bodov. Nameranú závislosť $j = f(I, \lambda)$ možno nájsť v grafe na obrázku 5, arbitrárna jednotka j zodpovedá hodnote udanej 8-bitovým A/D prevodníkom na fotonásobiči, presnosť Δj každého bodu je teda $\pm 0,5$ arb u.



Obr. 5: Prúdová frekvenčná charakteristika polovodičového lasera

Ako vidno z grafu na obrázku 5, vlnová dĺžka stimulovanej emisie λ_{max} (maximum j hustoty žiarivosti lasera) sa pre malé prúdy (medzi $i_0 \approx 17$ mA a 22 mA) posúva s rastúcim prúdom k jemne vyšším vlnovým dĺžkam (toto pravdepodobne súvisí so zmenou teploty, viac v stati 3.4) a medzi $I = 22,5$ mA a $I = 22,7$ mA (dva merané body I) sa skokovo zmení z $\lambda_{max} = 650,78$ nm na $\lambda_{max} = 651,05$ nm. Podľa grafu na obrázku 2 by sa však celková žiarivosť J mala monotóone zvyšovať so zvyšujúcim sa prúdom, to je v korelácii so zvyšujúcim sa $J = \int_{\text{spektrum}} j d\lambda$, ako ukazuje graf na obrázku 6, ktorého závislosť je určená integráciou závislosti $j = f(\lambda)$ pre jednotlivé prúdy laserom.

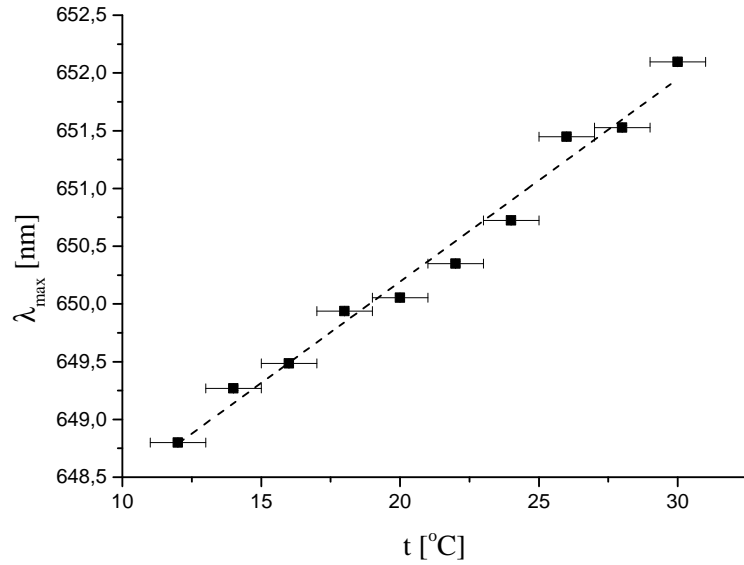


Obr. 6: Závislosť celovej žiarivosti lasera na pretekajúcom prúde

3.4 Teplotná závislosť vlnovej dĺžky stimulovanej emisie a svetelného výkonu laserovej diódy

Na nastavenie teploty sme použili peltierov článok, ktorého jedna plocha bola tepelne vodivo spojená s diódou a na druhej bol inštalovaný chladič. Napájali sme ho stabilizovaným zdrojom a teplotu sme odčítali teplotnou sondou inštalovanou na dióde pripojenou k multimetru *PeakTech 2010 PPM*. Ten dokázal teplotu odčítať len s presnosťou na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, toto považujeme za nepresnosť určenia jej hodnoty.

Teplotnú závislosť sme merali pre prúd diódou $I = 20\text{ mA}$ a pre teploty $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozstupom $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vlnovú dĺžku stimulovanej emisie sme určili ako vlnovú dĺžku λ_{max} , pri ktorej sa nadobúda maximum hustoty žiarenia j . Hustotu žiarenia sme znova poznali iba v arbitrárnych jednotkách, to ale nevaďí, zatiaľ nás zaujíma iba poloha maxima. Graf závislosti $\lambda_{max} = f(t)$ možno nájsť na obrázku 7. Chybové úsečky zodpovedajúce neistote vo vlnovej dĺžke nevidno, sú príliš malé, teda celá nepresnosť určenia pochádza z neistoty v teplote.



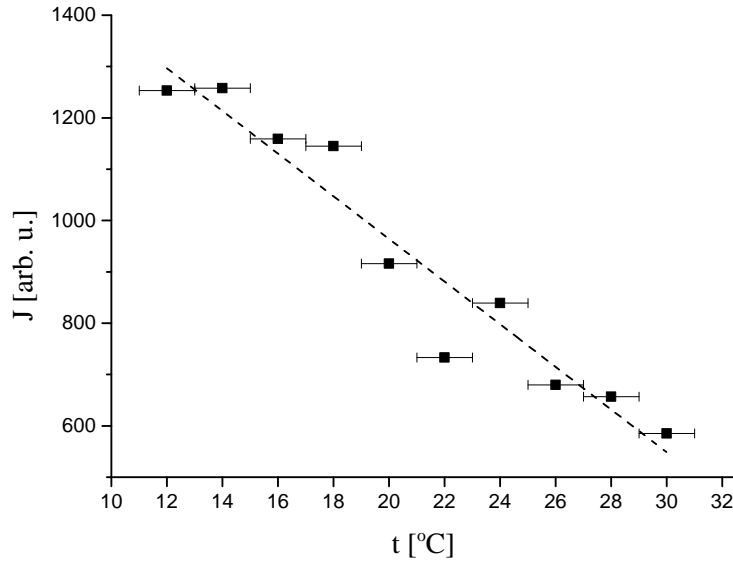
Obr. 7: Teplotná závislosť vlnovej dĺžky stimulovanej emisie

Ako z grafu na obrázku 7 vidno, pri prúde 20 mA rastie s teplotou diódy aj vlnová dĺžka stimulovanej emisie. Dáta sú preložené afínnou funkciou predpisu $\lambda_{max} = pt + q$, koeficienty tohto fitu sú zapísané v tabuľke 3.

Tabuľka 3: Hodnoty koeficientov fitu závislosti $\lambda_{max} = f(t)$ pri $I = 20$ mA

	p [nm°C ⁻¹]	q [nm]
hodnota	0,1765	646,7
neistota	0,008	0,2

V grafe na obrázku 8 vidno závislosť celkovej žiarivosti J na teplote v arbitrárnych jednotkách, v tomto prípade súčet výstupov 8-bitového prevodníka cez všetky merané body.



Obr. 8: Teplotná závislosť žiarivosti laserovej diódy

Pri meraní závislosti $J = f(t)$ (pričom J stotožňujeme a na multiplikatívnu konštantu s výstupným výkonom) sme neuvažovali chybu určenia J , keďže fotonásobič je veľmi citivé zariadenie a nepresnosť daná zaokrúhlením na hodnotu prevodníka sa pri sčítaní cez celý interval vyruší. Závislosť v grafe na obrázku 8 je preložená afinnou funkciou predpisu $J = pt + q$, koeficienty tohto fitu sú zapísané v tabuľke 4.

 Tabuľka 4: Hodnoty koeficientov fitu závislosti $J = f(t)$ pri $I = 20$ mA

	p [arb. u.]	q [arb. u.]
hodnota	-42	1800
neistota	4	90

3.5 Výkonová účinnosť laseru

Podľa [ADL] vieme, že 10 mW výstupného svetelného výkonu zodpovedá prúd monitorovacou fotodiódou I_g typicky 0,3 mA, minimálne 0,1 mA a maximálne 0,4 mA. Pre prúd laserom $I = 19,9(2)$ mA bol prúd monitorovacou fotodiódou (meraný galvanometrom) $I_g = 20(1) \mu\text{A}$ a napätie na laseri 2,105(8) V.

Najlepší predpoklad, ktorý môžeme urobiť, je predpoklad lineárneho správania fotodiódy, teda že prúd monitorovacou fotodiódou I_g zodpovedá výstupnému výkonu

lasera P_{out} až na multiplikatívnu konštantu k :

$$P_{out} = kI_g, \quad (5)$$

z čoho vieme pomocou údajov z [ADL] určiť multiplikatívnu konštantu na typicky $k = 33 \text{ V}$, na minimálne a maximálne $k = 100 \text{ V}$ a $k = 25 \text{ V}$ respektíve. Z toho potom použitím vzťahu 5 dopočítame výstupný výkon lasera na typicky $P_{out} = 0,66 \text{ mW}$, na minimálne a maximálne $P_{out} = 0,25 \text{ mW}$ a $P_{out} = 1 \text{ mW}$ respektíve. Keďže príkon $P = UI$ na laserovej dióde bol $P \approx 42 \text{ mW}$, účinnosť bola (použitím vzťahu 3) typicky $\eta = 0,016$, minimálne a maximálne $\eta = 0,006$ a $\eta = 0,024$ respektíve.

Keďže nepoznáme presné parametre diódy a dokonca ani presné vzťahy, ktorými sa výkon riadi, môžeme určiť účinnosť lasera len veľmi približne, na $\eta = 0,015(9)$.

4 Diskusia výsledkov

Pri meraniach spektra ortuťovej výbojky aj lasera sme volili šírku vstupnej štrbiny monochromátora $30 \mu\text{m}$. Takto malá štrbina má za následok malú intenzitu prechádzajúceho svetla, no fotonásobič je dostatočne citlivý. Širšia štrbina by mala za následok neistotu v polohe prechádzajúceho lúča a tá by zase mala za následok neistotu v uhle po interakcii s disperzným prvkom – došlo by k rozmazaniu spektrálnych čiar na širšie intervaly.

Pri spracovaní merania sme v dvoch rôznych prípadoch zanedbali nepresnosť galvanometra, raz pri spracovaní svetelnej charakteristiky, raz pri určení výkonovej účinnosti.

V prvom prípade (graf na obrázku 2) sme potrebovali výstup z galvanometra len na určenie polohy u_0 , za predpokladu (u analógového prístroja istotne dobre splneného) monotónie výstupu v závislosti na skutočnej veľkosti veličiny teda vôbec nepotrebujeme poznať presnosť galvanometra, dokonca nemusí mať ani lineárnu stupnicu.

V druhom prípade (pri určení výkonovej účinnosti) sme urobili predpoklad, že nepresnosť galvanometra je menšia, ako obrovská nepresnosť určenia k plynúca z veľmi nepresnej hodnoty I_g pre $P_{out} = 10 \text{ mW}$ podľa [ADL]

Žiarivosť sme v celom spracovaní uvádzali iba v arbitrárnych jednotkách (rozdielnych naprieč rôznymi meraniami). Je to preto, že nemáme nijak okalibrovaný fotonásobič a nevieme nič o tom, aký signál zodpovedá akému skutočnému osvetleniu. Okrem toho sme intenzitu signálu nastavovali zmenou svetlosti clony na svtupe monochromátora, čo sme robili úplne bez merania jej skutočných rozmerov – nastavovali sme ju tak, aby sme využili celú šírku 8-bitovej zbernice fotonásobiča. Samozrejme, nemenili sme ju medzi rôznymi meraniami toho istého druhu (state 3.3 a 3.4), aby sme mohli medzi sebou porovnať hodnoty pri jednotlivých meraniach.

Účinnosť lasera vyšla veľmi nízka. V datasheete^[ADL] nie je uvedená hodnota, s ktorou by sme mohli nami dopočítanú hodnotu η porovnať. Je možné, že laser má naozaj tak nízku účinnosť, ale je aj možné, že pracujeme so zlou hodnotou nejakej konštanty, špeciálne napríklad nevieme určiť ani či pracujeme s laserom ADL-65102TL, keďže tento bol zavretý v moduli s teplomerom a Peltierovým článkom a nemali sme k nemu prístup.

5 Záver

Zmerali sme voltampérovú aj svetelnú charakteristiku polovodičového lasera ADL-65102TL, závislosti sme vizualizovali a stanovili sme hraničný prúd $i_0 = 16,7(8)$ mA.

Pomocou ortufovej výbojky sme okalibrovali monochromátor SPM 2 na meranie emisných spektier a vysvetlili sme voľbu veľmi úzkej vstupnej štrbiny.

Premerali sme emisné spektrum ADL-65102TL pre rôzne podprahové aj nadprahové prúdy laserom a určili sme vlnovú dĺžku λ_{max} stimulovanej emisie na $\lambda_{max} = 650,78$ nm, resp. $\lambda_{max} = 651,05$ nm.

Pri nadprahovej hodnote prúdu laserom $I = 20$ mA sme určili a znázornili teplotnú závislosť vlnovej dĺžky λ_{max} stimulovanej emisie, rovnako ako teplotnú žiarivosť J .

Pri hodnote prúdu laserom $I = 19,9(2)$ mA sme určili výkonovú čínosť lasera na $\eta = 0,015(9)$.

6 Zoznam použitej literatúry

- [St] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Študijný text k meraniu: Štúdium polovodičového lasera*. [cit. 2017-03-10]. URL: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_315.pdf>.
- [Pm] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Pokyny pro měření: Štúdium polovodičového lasera*. [cit. 2017-03-10]. URL: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_315.pdf>.
- [Np] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Návod k programu: Štúdium polovodičového lasera*. [cit. 2017-03-10]. URL: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/pokyny/mereni_315_2.pdf>.
- [UT] METEX. *GES Electronics: Stolní digitální multimetr UT803* [cit. 2017-03-11]. URL: <<http://www.ges.cz/sk/stolni-digitalni-multimetr-uni-t-ut-803-GES07313221.html>>.
- [RFT] METEX. *Blunk Electronic: Digitalvoltmeter G-1002.500* [cit. 2017-03-11]. URL: <http://www.blunk-electronic.de/datasheet/schematics/DVM_G-1002-500.pdf>.
- [ADL] Arima Lasers. *ADL-65102TL Datasheet* [cit. 2017-03-10]. URL: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.511-269.1.PDF>>.