

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
FIZIKALNA MERILNA TEHNIKA

Marko Mahne

Diodno črpan Yb:YAG laser z nastavljivo
frekvenco

Zaključna naloga

MENTOR: prof. dr. Marko Zgonik

SOMENTOR: dr. Aleksej Majkić

Ljubljana, 2014

Izjava o avtorstvu in objavi elektronske oblike

izjavljam:

- da sem zaključno nalogo z naslovom Diodno črpan Yb:YAG laser z nastavljivo frekvenco izdelal samostojno pod mentorstvom prof. dr. Markota Zgonika in dr. Alekseja Majkića,
- da je elektronska oblika dela identična s tiskano obliko in
- da Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani dovoljujem objavo elektronske oblike svojega dela na spletnih straneh Repozitorija Univerze v Ljubljani.

Ljubljana, 17.9.2014

Podpis:

ZAHVALA

Zahvaljujem se oddelku za kompleksne snovi inštituta Jožef Stefan, ki je delo omogočil, in prof. dr. Marku Zgoniku za mentorstvo. Posebno bi se rad zahvalil dr. Alekseju Majkiću za napotke, svetovanje in pomoč pri praktičnem delu ter recenzijo zaključne naloge.

Zahvalil bi se tudi kolegu Žigi Čikiću za pomoč pri delu in dr. Andreju Petelinu za uporabo njegovih programov.

POVZETEK

Sestavljen in testiran je bil laser na osnovi Yb:YAG kristala. Pri delujočem laserju so bile opravljene meritve polmera snopa z knife-edge metodo na različnih oddaljenostih od izhodnega zrcala. Rezultati so bili uporabljeni za izračun faktorja kvalitete izhodnega snopa M^2 . Tako izmerjeni polmeri so bili primerjani s polmeri snopa, izmerjenimi s CMOS kamero, ter z računskim modelom. Izmerjene so bile izhodne moči laserja v odvisnosti od moči črpalne svetlobe ter odbojnih vrednosti izhodnega zrcala. Izmerjene so bile tudi minimalne črpalne moči, potrebne za delovanje laserja pri različnih vrednostih odbojnosti izhodnih zrcal. S pomočjo teh podatkov smo ovrednotili notranje izgube v resonatorju. Pri meritvah nastavljenosti laserske frekvence je bila v resonator vstavljena dvolomna ploščica iz kvarčnega stekla, ki smo jo vrteli in s tem izbirali željene frekvence. Izmerjena je bila tudi polarizacija laserskega snopa z vstavljeno dvolomno ploščico in brez nje.

Ključne besede: laser, Yb:YAG, M^2 , profil snopa, nastavljenost frekvence, izgube v resonatorju

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.60.By, 42.60.Da, 42.60.Fc, 42.60.Jf, 42.60.Lh, 42.60.Pk

ABSTRACT

Laser based on an Yb:YAG gain medium was assembled and tested. Beam spot sizes were measured with knife-edge method at various distances from the output coupler in order to determine the beam quality factor M^2 . Measured spot sizes were then compared with spot sizes obtained from beam images taken with a CMOS camera, and mathematically modeled spot sizes. Laser output power was measured as a function of diode pump power and output coupler reflectivity. For the assessment of resonator losses, threshold pump power required for laser operation was measured with respect to output coupler reflectivity. For laser output frequency tuning, an intracavity birefringent crystal quartz plate was used. Polarization of output laser beam was measured without the birefringent plate and with the plate inserted in the resonator.

Keywords: laser, Yb:YAG, M^2 , beam profile, frequency tuning, resonator losses

PACS: 42.55.-f, 42.55.Xi, 42.60.-v, 42.60.By, 42.60.Da, 42.60.Fc, 42.60.Jf, 42.60.Lh, 42.60.Pk

KAZALO

UVOD	1
MERSKE METODE.....	2
MODELIRANJE LASERSKEGA SNOPA V RESONATORJU.....	3
IZDELAVA LASERJA IN MERJENJE KARAKTERISTIK IZHODNEGA SNOPA	5
Knife-edge metoda meritve prečnega polmera žarka.....	5
Merjenje profila snopa s CMOS senzorjem	9
SPREMINJANJE VALOVNE DOLŽINE IZHODNEGA LASERSKEGA SNOPA	13
MERITEV LASERSKE MOČI V ODVISNOSTI OD REFLEKTIVNOSTI IZHODNEGA ZRCALA	15
REZULTATI	18
VIRI	19

UVOD

Delo je potekalo v laboratoriju za nelinearno optiko na odseku za kompleksne snovi na Inštitutu Jožef Stefan. V laboratoriju se izvajajo poskusi in meritve s področja laserskih tehnologij, v sklopu katerih sem tudi sam delal na izdelavi in optimizaciji laserja na osnovi kristala $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, ki je dopiran z Yb^{3+} (na kratko Yb:YAG).

Laserji na osnovi Yb:YAG kristala so široko uporabljeni v industriji in v raziskovalne namene. Zaradi majhnega kvantnega defekta je kristal manj dovzeten za termalne efekte, povezane s črpalno svetlobo, kar ga naredi uporabnega za močnostne aplikacije v kilovatnih območjih. Pojav kvantnega defekta je v tehnologiji laserjev povezan z razliko v energiji med fotoni črpalne svetlobe in fotoni izsevane laserske svetlobe (v našem primeru sta valovna dolžina črpalne svetlobe $\lambda_{\text{črp}} = 940 \text{ nm}$ in valovna dolžina laserske svetlobe v okolici $\lambda_i = 1030 \text{ nm}$). Razlika v energijah fotonov se porabi za gretje kristala, kar predstavlja neželen stranski učinek.

Ena izmed prednosti je tudi relativno dolg razpadni čas atomov v vzbujenem stanju (okrog 1 ms), kar je ugodno za pulzno delovanje laserja. Poleg tega ima laser tudi širok emisijski spekter, kar omogoča nastavljalnost frekvence delovanja. Okrog osrednje laserske valovne dolžine λ_i je emisijsko okno široko približno 30 nm.

Obseg dela je zajemal načrtovanje in postavitev delujočega laserskega resonatorja, hladilnega sistema, potrebnega za ohlajanje izvora vzbujevalne svetlobe in kristala samega, ter merilnih metod, potrebnih za karakterizacijo laserja ob delovanju. Cilj zadanega dela je bil izdelava laserskega sistema s čim višjo kvaliteto žarka ter čim širšo frekvenčno nastavljalnostjo.

Kot največji izziv sem predpostavil doseganje čim večje energijske učinkovitosti laserja, saj je leta močno odvisna od samih sestavnih komponent, natančnosti njihove postavitve ter močnega in stabilnega hlajenja.

MERSKE METODE

Pri izgradnji laserja ter opravljenih meritvah je bilo uporabljeno več merilnih instrumentov in sestavnih delov.

Sestavni deli celotnega laserskega sistema so naštetih spodaj:

- Črpalna dioda proizvajalca BWT Beijing LTD. Maksimalna nazivna izhodna moč svetlobe: 10 W pri valovni dolžini 940 nm. Dioda ima vgrajen termočlen. Svetloba je fokusirana v optično vlakno, ki je speljana do laserskega resonatorja za vzbujanje kristala.
- Napajalnik za črpalno diodo proizvajalca Thorlabs. Diodi za obratovanje dovaja ustrezen električni tok, obenem pa z napajanjem termočlena skrbi za ustrezno hlajenje ter regulacijo temperature.
- Hladilni sistem za Yb:YAG kristal. Skrbi za nadzorovanje temperature kristala ter ustrezno hlajenje.
- Yb:YAG kristal valjaste oblike. Premer 3 mm, dolžina 5 mm, 5% dopiran (5% atomov itrija je zamenjanih z atomi iterbija). Postavljen je v vodoravni ravnini.
- Vhodno zrcalo proizvajalca Altechna. Zrcalo je ravno, prepušča črpalno svetlobo, odbija pa lasersko.
- Izhodno zrcalo. Uporabljena so bila zrcala z različnimi vrednostmi odbojnosti za lasersko svetlobo.
- Zbiralna leča z goriščno razdaljo 50 mm.

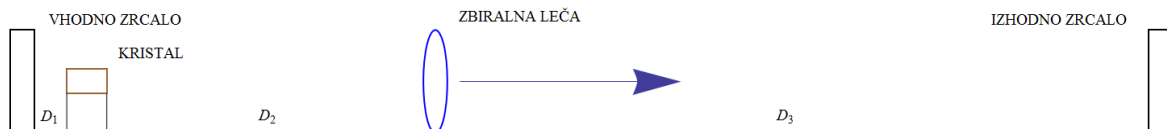
Meritve so potekale s pomočjo naslednjih naprav:

- Merilec energije in moči proizvajalca Coherent. Meri moč v območju od 0 do 10 W, možnost povezave z računalnikom
- Električni koračni motor proizvajalca Physics Instruments. Skrbel je za natančne premike britvice ob meritvah polmera snopa. Možnost povezave z računalnikom.
- CMOS kamera proizvajalca Thorlabs. Ločljivost 1280 x 1024 pikslov.
- Analizator polarizacije izhodnega snopa.
- Voltmeter s priklopljeno fotodiodo. Uporabljen je bil za meritve zelo majhnih izhodnih moči.
- Spektrometer proizvajalca Avantes. Območje uporabnosti med 200 nm in 1160 nm. Uporabljen je bil za meritve valovnih dolžin laserskega snopa.

MODELIRANJE LASERSKEGA SNOPA V RESONATORJU

Resonator je bil sestavljen iz dveh ravnih zrcal, ojačevalnega medija (kristal Yb:YAG) ter zbiralne leče.

Vhodno zrcalo je imelo visoko prepustnost pri valovni dolžini črpalne svetlobe ($T > 95\%$ pri $\lambda = 940$ nm) ter visoko odbojnost za lasersko svetlobo ($R > 99.5\%$ pri $\lambda = 1030$ nm). Izhodna zrcala so bila različno propustna za lasersko svetlobo (vrednosti odbojnosti za lasersko svetlobo od $R = 0,54$ do $R = 0.99$). Kristal je bil zavrt v indijevo folijo ter vpet v aluminijast nosilec, ki je bil aktivno hlajen. V resonator je za potrebe fokusiranja svetlobe v kristalu vstavljena tudi zbiralna leča z goriščno razdaljo $f = 50$ mm. Spodnja slika prikazuje postavitev resonatorja.



Slika 1: Postavitev laserskega resonatorja v pomanjšanem merilu. Oznake D_1 , D_2 in D_3 predstavljajo razdalje med elementi resonatorja

Dolžina celotnega resonatorja, razdalja med kristalom in zbiralno lečo ter razdalja med zbiralno lečo in izhodnim zrcalom so po vrsti $L = 142$ mm, $D_2 = 45$ mm in $D_3 = 88$ mm. Razdalja med vhodnim zrcalom in kristalom je znašala $D_1 = 4$ mm. Črpalna dioda je oddajala svetlobo z valovno dolžino $\lambda = 940$ nm. Črpalna svetloba je bila preko optičnega vlakna vodena do zbiralne leče. Le-ta je bila uporabljena za fokusiranje svetlobe na laserski kristal. Premer črpalnega snopa na kristalu je bil $w_0 = 0.15$ mm.

Podatki zadostujejo za modeliranje laserskega snopa v resonatorju. Ostaja še en parameter, ki pa s črpalno močjo ni konstanten, to je goriščna razdalja samega kristala. Ob fokusiranju črpalne svetlobe na sredinsko os kristala se v radialni smeri pojavi močan temperaturni gradient, ki povzroči odvisnost lomnega količnika od radija. Kristal se tako začne obnašati kot zbiralna leča z goriščno razdaljo, odvisno od moči svetlobe, ki pada na kristal. V grobem približku lahko ocenimo goriščno razdaljo kristala z naslednjo zvezo ([1], poglavje 7.3.2)

$$f = \frac{\pi K w_0^2}{P_h \left(\frac{dn}{dT} \right)} \quad (1)$$

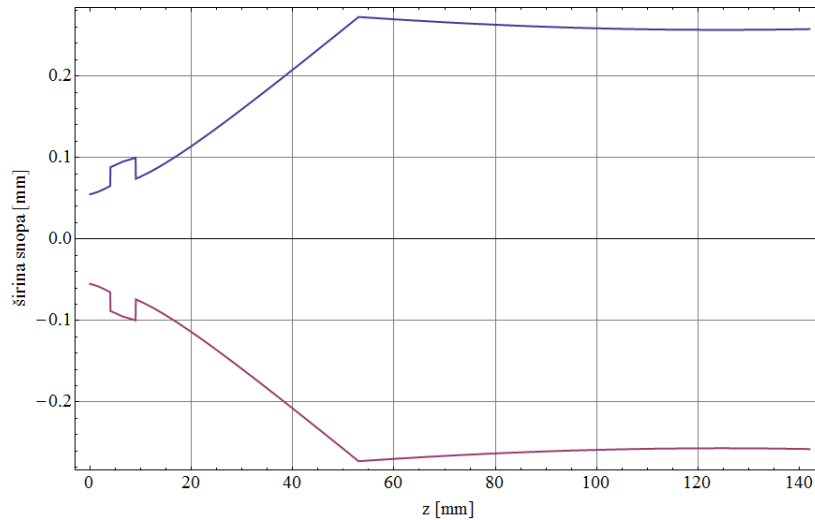
P_h predstavlja optično moč, ki se pretvori v toploto v kristalu, w_0 polmer črpalnega snopa na kristalu, K toplotno prevodnost kristala, dn/dT pa spremembo lomnega količnika s temperaturo. Za Yb:YAG kristal znaša vrednost $dn/dT = 7.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $K = 11.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [2]. Polmer črpalnega snopa na kristalu je bil približno $w_0 = 0.08$ mm. Delež črpalne svetlobe, ki se pretvori v toploto v kristalu, je približno 0.11 ([1], poglavje 7). V našem obsegu moči črpalne svetlobe, ki je znašal od $P_1 = 3.20$ W do $P_2 = 8.44$ W, lahko pričakujemo goriščno razdaljo 3 – 9 cm.

Resonator matematično opišemo z ABCD optičnimi matrikami, pripadajočimi posameznim elementom v resonatorju ter prehodi med njimi ([3], poglavje 2.7). Polmer laserskega snopa v določeni točki v resonatorju je v zraku podan kot ([3], poglavje 3.3.2).

$$w^2 = \frac{2\lambda|B|}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2}} \quad (2)$$

Parametri A, B in D pripadajo matriki prehoda, ki nastane z množenjem matrik vseh optičnih elementov, ki jih laserski snop preleti ob enem polnem obhodu resonatorja. Pogoji so, da ostane kompleksni krivinski radij snopa enak po enem obhodu resonatorja.

Spodnji graf prikazuje razširjanje snopa v resonatorju. Avtor programa za modeliranje laserskega snopa v resonatorju, s pomočjo katerega je nastala slika 2, je dr. Andrej Petelin.



Slika 2: razširjanje snopa v resonatorju pri $f_k = 3 \text{ cm}$.

Na skrajni levi se v grafu nahaja vhodno zrcalo, na skrajni desni pa izhodno. Viden je skok v širini snopa pri prehodu skozi kristal, kar je posledica računskih artefaktov. Polmer snopa na izhodnem zrcalu je po zgornjem preračunu $w_{izh} = 0.26 \text{ mm}$.

Ob odsotnosti lečenja je modelirani polmer izhodnega snopa $w_{izh} = 0.23 \text{ mm}$. Razlika med vrednostma je relativno majhna, kar nakazuje na neobčutljivost resonatorja na efekte lečenja v kristalu.

IZDELAVA LASERJA IN MERJENJE KARAKTERISTIK IZHODNEGA SNOPA

Laser je bil izdelan iz komponent, ki so bile na voljo v laboratoriju, kjer je delo potekalo. Začetek dela je vključeval testiranje moči diode za črpalno svetlobo, meritev valovne dolžine izhodne svetlobe ter skrb za pravilno hlajenje diode. Kristal je bil vpet v hladilnik iz aluminija, ki je bil temperaturno stabiliziran s Peltierjevim elementom. Postavitev laserskega resonatorja je potekala s pomočjo He-Ne laserja, katerega snop je predstavljal optično os na katero so bila potem naravnana zrcala, zbiralna leča ter kristal.

Ena izmed najbolj pomembnih meritev, ki jo izvedemo za ovrednotenje kakovosti delovanja laserja, je meritev širine snopa laserskega žarka, izhajajočega iz resonatorja (tako v predelu, kjer je snop najožji – grlo snopa, kot tudi na večjih oddaljenostih), ter meritev profila intenzitete žarka.

Najmanjšo divergenco vzdolž osi potovanja snopa nudi osnovni način laserskega delovanja, TEM₀₀ oziroma osnovni Gaussov način, pri katerem je prečno električno polje snopa porazdeljeno po Gaussovi distribuciji.

Knife-edge metoda meritve prečnega polmera žarka

Kot že omenjeno, je prečni amplitudni profil električnega polja laserskega snopa v TEM₀₀ delovanju oblike Gaussove distribucije, kar velja tudi za intenzitetni profil, podan v naslednji zvezi ([1], poglavje 5.1.2)

$$I(x) = I_0 e^{\frac{-2x^2}{w^2}} \quad (3)$$

x predstavlja prečno smer, w pa dogovorjen polmer snopa. Na razdalji w stran od središča snopa pade intenziteta na $1/e^2$ središčne vrednosti. Kumulativna intenziteta vzdolž prečnega preseka snopa, je torej oblike funkcije napake (*error function* ali krajše Erf(x)).

Kumulativno funkcijo, s katero bomo ovrednotili intenziteto snopa v prečni smeri x , napišemo kot

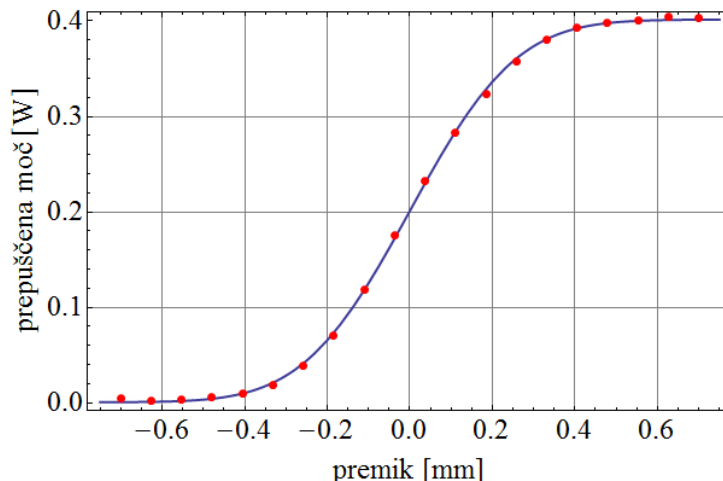
$$D(x) = \frac{1}{2} A \left(\operatorname{Erf} \left(\frac{\sqrt{2}x}{\sigma} \right) + 1 \right) \quad (4)$$

kjer je A poljuben prilagoditveni faktor, σ pa standardna deviacija distribucije, ki pa je kar enaka polmeru snopa w v tem primeru. V praksi se metoda uporablja na sledeč način. S predmetom, ki ima oster rob (v našem primeru britvica), postopoma odkrivamo snop s premikanjem britvice, ter hkrati merimo prepuščeno moč snopa, ko le-ta preleti britvico. Ko je delež blokirane moči snopa enak deležu prepuščene moči, lahko sklepamo, da se z britvico nahajamo ravno na sredini žarka. Ta lega nam določa ničelno pozicijo, iz katere lahko naredimo simetričen interval, na katerem bo meritev potekala. Britvico nato premaknemo iz enega konca intervala na drugega, pri čemer je v obeh skrajnih točkah intervala snop bodisi popolnoma zakrit ali odkrit, vmes pa prepuščena moč po normalizaciji sledi zgoraj opisani kumulativni funkciji. Natančno pomikanje britvice je kritičnega pomena; v ta namen se uporabljajo električni koračni motorji, ki lahko neposredno komunicirajo z računalnikom preko ustreznega programa, ter mu tako sproti sporočajo vse podatke, potrebne za uspešno izvedeno meritev.

Istočasno se skupaj s pozicijo britvice beleži prepuščena moč laserskega snopa. Ta bo enaka moči nemotenega snopa v eni skrajni poziciji britvice, v drugi skrajni legi bo pa enaka nič. Končni

meritvi laserske moči v odvisnosti od lege britvice nato z ustreznim programom priredimo najbolj prilagajajočo se obliko kumulativne funkcije intenzitetne porazdelitve $D(x)$, iz katere lahko razberemo polmer w .

Na sliki 3 je prikazan primer kumulativne porazdelitve moči laserskega snopa v odvisnosti od prečne koordinate (črpalna moč $P_{in} = 4.93$ W, razdalja od izhodnega zrcala $z = 255$ mm).



Slika 3: prepuščena moč v odvisnosti od položaja britvice. Meritvam je prilagojena kumulativna funkcija.

Polmeri snopov so bili izmerjeni na različnih razdaljah od izhodnega zrcala in pri različnih močeh črpalne svetlobe, ki je vpadala na iterbijev kristal. Ta se v kristalu sicer ne absorbira popolnoma, absorpcija je pri različnih močeh črpanja podana v spodnji tabeli. Podana je še pretvorba med gonilnim tokom skozi diodo ter močjo izhodne svetlobe.

Tabela 1: črpalna moč diode v odvisnosti od toka

Tok na diodi [A]	4	5	6	7	8	9	10
Optična črpalna moč [W]	3.20	4.05	4.93	5.82	6.70	7.55	8.44

Tabela 2: absorpcija črpalne svetlobe v kristalu brez laserskega delovanja pri različnih črpalnih močeh

Tok [A]	Vpadna moč [W]	Prepuščena moč [W]	Absorbiran delež
4.8	3.90 W	0.31 W	0.92
6.0	4.93 W	0.40 W	0.92
7.2	6.00 W	0.48 W	0.92

Meritve absorpcije so potekale brez laserskega delovanja. Kadar laser deluje, so razmere drugačne, a ne bistveno. Pri nadaljnjih navedbah črpalne moči so podane vrednosti z upoštevanom absorpcijo.

Spodnja tabela podaja rezultate širjenja snopa pri različnih močeh črpanja

Tabela 3: polmeri laserskega snopa na različnih oddaljenostih in pri različnih črpalnih močeh. Parameter z predstavlja oddaljenost od zrcala.

z [mm] Tok [A]	5	35	65	95	125	155	255	475	755
4	0.306	0.291	0.292	0.298	0.317	0.325	0.383	0.594	1.060
5	0.288	0.289	0.290	0.296	0.343	0.338	0.399	0.571	0.951
6	0.288	0.289	0.292	0.298	0.319	0.335	0.408	0.579	0.967
7	0.283	0.282	0.294	0.302	0.321	0.333	0.409	0.622	0.981
8	0.279	0.273	0.282	0.301	0.326	0.343	0.400	0.602	0.984

Izmerjeni polmeri snopa imajo določeno negotovost, ki je povezana z negotovostmi vseh merilnih inštrumentov in naprav, uporabljenih pri meritvah, ter laserjem samim. V praksi je bilo med kontinuiranim delovanjem laserja opazno nihanje in s časom tudi padanje moči (zaradi segrevanja kristala), kar ima za posledico nekonsistentne izmerke moči med kumulativno meritvijo s knife-edge metodo. Omejena je tudi natančnost električnega koračnega motorja, ki skrbi za premik britvice. Tudi geometrijske lastnosti same britvice niso popolne. Rob britvice namreč ni idealno raven, kar v kombinaciji s prečnim premikom britvice privede do neskladnosti med meritvami znotraj ene kumulativne meritve.

Zbrane podatke lahko uporabimo za ekstrapolacijo funkcije razširjanja polmera snopa v odvisnosti od razdalje do izhodnega zrcala. Razširjanje snopa je hiperbolične narave, najmanjšo divergenco snopa pa kaže osnovni TEM₀₀ način delovanja. Širjenje snopa pri višjih načinih delovanja je s širjenjem snopa v osnovnem načinu povezano preko faktorja M² v naslednji obliki [4]

$$w^2(z) = w_0^2 + M^4 \left(\frac{\lambda}{\pi w_0} \right)^2 (z - z_0)^2 \quad (5)$$

Širino snopa merimo samo prečno. Faktor w₀ označuje polmer snopa v grlu, z₀ pa razdaljo vzdolž snopa od grla do mesta merjenja. Faktor M² ima vrednost 1 za osnovni Gaussov snop, ter M² > 1 za snop sestavljen iz višjih redov. Vse tri parametre lahko dobimo s prilagajanjem zgornje enačbe našim izmerjenim podatkom. Ker je izhodno zrcalo ravno, lahko privzamemo, da se grlo snopa nahaja v njem, torej je parameter z₀ enak 0.

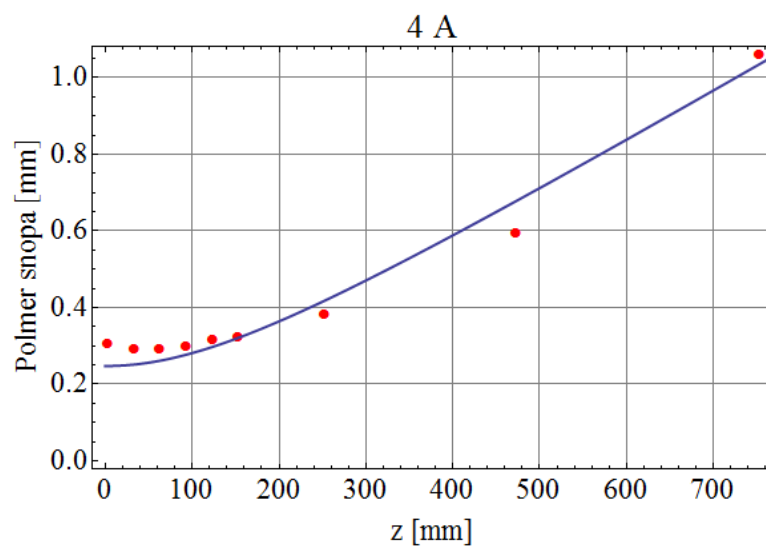
Spodnja tabela predstavlja izračunane vrednosti parametra M² in w₀ pri različnih močeh črpalne svetlobe ter pripadajoče standardne deviacije.

Tabela 4: izračunani parametri M², polmeri snopov ter pripadajoče standardne deviacije

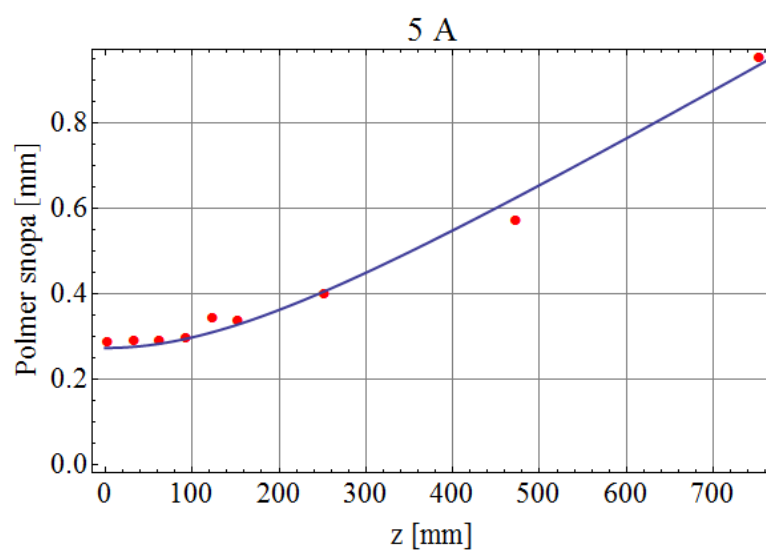
Tok [A]	Črp. moč [W]	M ²	σ (M ²)	w ₀ [mm]	σ (w ₀) [mm]	Moč laserja [mW]
4	2.94	1.006	0.145	0.247	0.039	120
5	3.73	0.986	0.066	0.273	0.020	270
6	4.54	0.990	0.068	0.268	0.020	389
7	5.35	1.024	0.034	0.271	0.010	551
8	6.16	0.999	0.060	0.265	0.017	753

V okviru naših meritev je snop tako iz vidika divergence zelo blizu Gaussovemu snopu. Največji vir negotovosti meritve faktorja M² je najverjetneje pomanjkanje meritev polmera snopa na večjih razdaljah – ISO Standard 11146 zahteva opravljanje približno polovico vseh meritev na razdalji, večji od dvakratne Rayleighove razdalje [5], ki se v našem primeru giblje okrog 270 milimetrov. Zaradi omejenega prostora in velikosti leč smo tako izvedli meritve zgolj na krajših razdaljah.

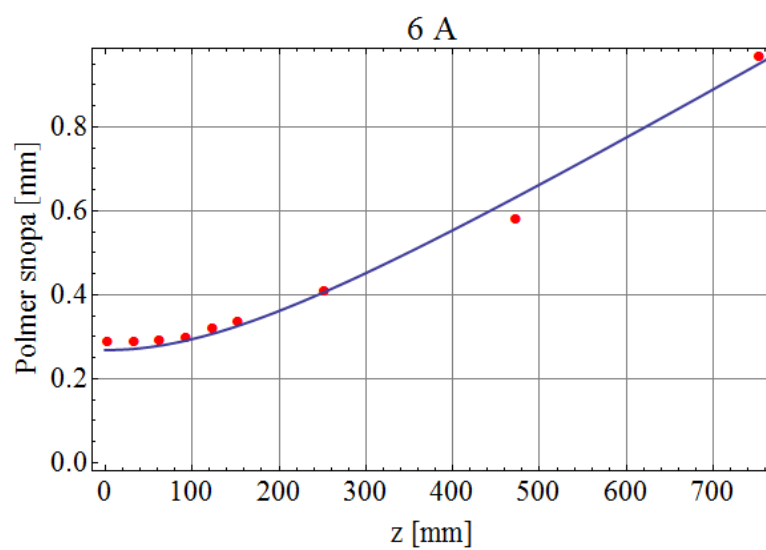
Grafi na naslednji strani prikazujejo meritve polmera snopov pri posameznih močeh ter pripadajoče prilagojene krivulje.



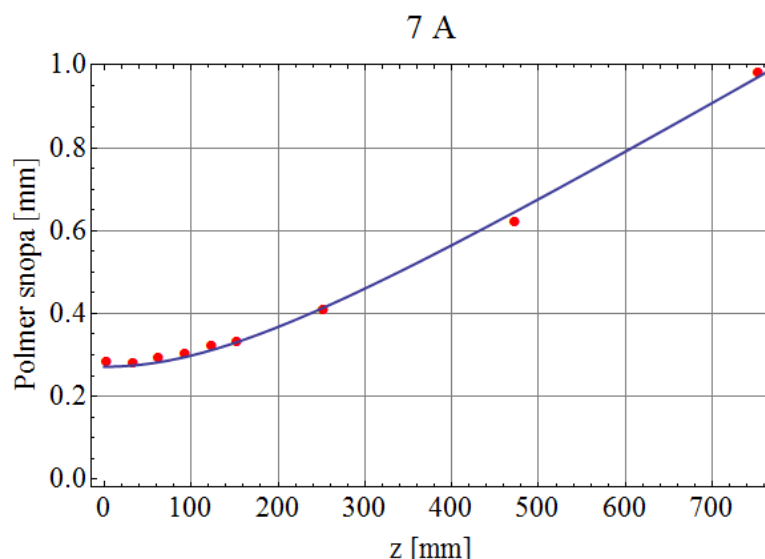
Slika 4: širjenje laserskega snopa po izhodu iz resonatorja pri črpalnem toku 4 A



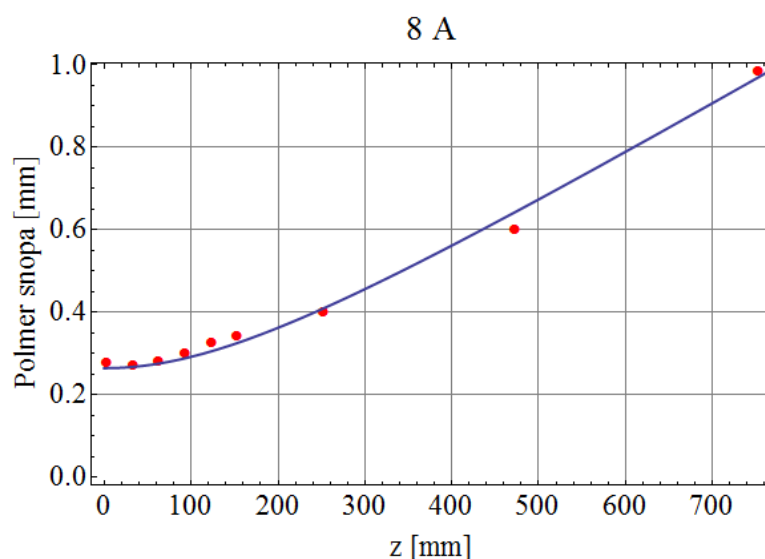
Slika 5: širjenje laserskega snopa po izhodu iz resonatorja pri črpalnem toku 5 A



Slika 6: širjenje laserskega snopa po izhodu iz resonatorja pri črpalnem toku 6 A



Slika 7: širjenje laserskega snopa po izhodu iz resonatorja pri črpalnem toku 7 A



Slika 8: širjenje laserskega snopa po izhodu iz resonatorja pri črpalnem toku 8 A

Ob večanju moči črpalne svetlobe lahko pride do prej opisanega pojava lečenja kristala. Iz rezultatov je opaziti, da efekt lečenja pri uporabljenih črpalnih močeh še ni prišel do izraza. K temu znatno pripomore manjši kvantni defekt Yb^{3+} ionov, kar posledično pomeni manjšo pretvorbo črpalne svetlobe v toploto v kristalu, ter sama neobčutljivost resonatorja na lečenje kristala.

Merjenje profila snopa s CMOS senzorjem

Karakterizacija žarka s pomočjo CMOS kamere se v teoriji sliši idealno, saj lahko natančno določimo tako intenzitetni profil v vseh smereh, kot tudi velikost snopa. V praksi se izkaže, da so CMOS elementi izjemno občutljivi že na zelo majhne intenzitete svetlobe, zaradi česar je izbira pravega filtra, ki zatne oziroma odbije večino vpadne laserske moči, ključnega pomena. Pri prehodu skozi filter bi morale karakteristike snopa ostati nespremenjene, le v tem primeru bi tako dobili realne meritve. Nadalje je bilo treba paziti na faktor γ , ki podaja zvezo med vpadlo intenziteto svetlobe in številsko vrednostjo posameznega CMOS elementa (ki je v našem primeru število od 0 do 1 – računamo z normaliziranimi sivinskimi vrednostmi). Za linearno zvezo med obema količinama, je potrebno faktorju γ nastaviti vrednost 1.

Izkazalo se je, da se le pri določenih močeh črpalne svetlobe (ter posledično laserske svetlobe) meritve polmera snopa s CMOS senzorjem ujemajo z meritvami snopa preko knife-edge metode. Razlog za odstopanje najverjetneje tiči v nelinearnem odzivu filtrov na vpadno moč laserske svetlobe, katerega posledica je popačitev snopa na CMOS senzorju, kar ima za posledico nepravilen izračun dejanskega polmera. Pri višjih močeh se filter, kamor vpada najvišja intenziteta, saturira, tako, da to območje ni več v sorazmernosti z območji, kamor pada manjša intenziteta. Ker je bilo pri višjih močeh uporabljeno več filtrov, je verjetno prišlo tudi do sipanja svetlobe na mejah med njimi

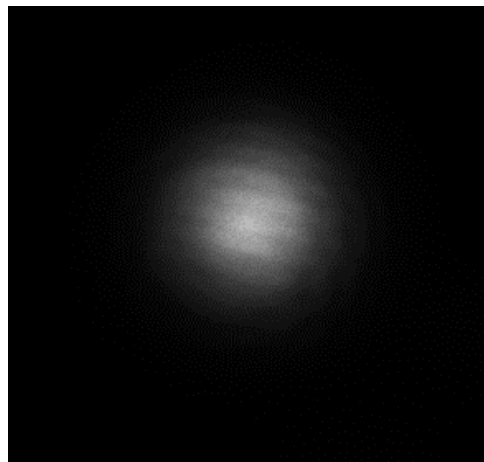
Potek meritve je potekal na naslednji način. Na ohišje kamere bil čim bližje senzorja pritrjen filter določene absorptivnosti, nakar je bila kamera postavljena na določeno razdaljo od izhodnega zrcala resonatorja. Razdaljo med filtrom in CMOS senzorji smo skušali minimizirati zato, da bi bila popačitev snopa na senzorjih zaradi filtra čim manjša.

Ravno tako smo skušali uporabiti čim manj filtrov hkrati, saj je vsaka najmanjša napaka na površini filtra hitro opazna na sliki, kar je imelo za posledico popolnoma neprimerno ozadje za slikanje samega žarka.

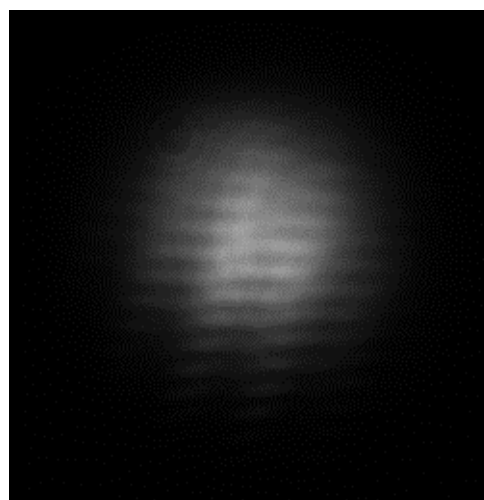
Slika 11 prikazuje profil intenzitete snopa iz črpalne diode. Profil ni popolnoma uniformen, zrnatost slike je posledica potovanja po optičnem vlaknu. Vidna je tudi interferenca svetlobe na delcih med filtri.

Primerna slika snopa je bila pretvorjena v številsko tabelo normaliziranih vrednosti od 0 do 1, ki so predstavljale različne odtenke sivine. S primernim algoritmom je bila poiskana najvišja vrednost, ki se je v grobem nahajala v centru snopa. Ta je predstavljala točko, iz katere se je nato v navpični in vodoravni smeri po celotni dolžini izluščilo številske vrednosti intenzitete. Tako smo neposredno pridobili podatke, katerim smo lahko priredili dve primerni Gaussovi porazdelitvi, ki sta nam dali polmera snopa v obeh smereh.

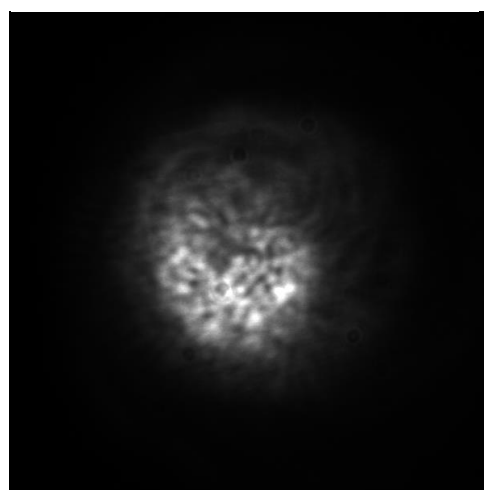
Na naslednji strani so prikazane meritve in rezultati za nekaj različnih moči laserske svetlobe. V tabeli 5 so prikazani podatki, pridobljeni z obdelavo slik. Na grafih sta prikazani obe Gaussovi krivulji (merjeni v navpični in vodoravni smeri) ter dejanske točke meritve. Vse slike so bile posnete na razdalji 40 mm, tako da lahko rezultate brez večje napake primerjamo z rezultati



Slika 9: slika laserskega snopa, posneta s CMOS kamero pri 5 A črpalnega toka na razdalji 40 mm od izhodnega zrcala



Slika 10: primer neprimerne slike laserskega snopa. Vidne so prečne interferenčne proge zaradi filtrov ter uklon na nepravilnosti oz. prašnem delcu (levo zgoraj).



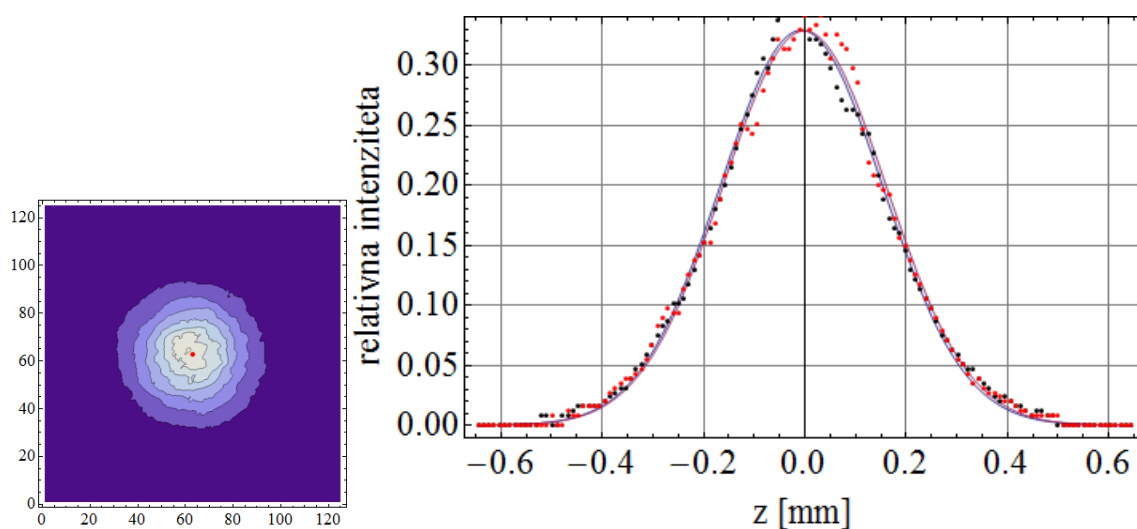
Slika 11: intenzitetni profil snopa črpalne diode

meritve polmera snopa s knife-edge metodo na razdalji 35 milimetrov.

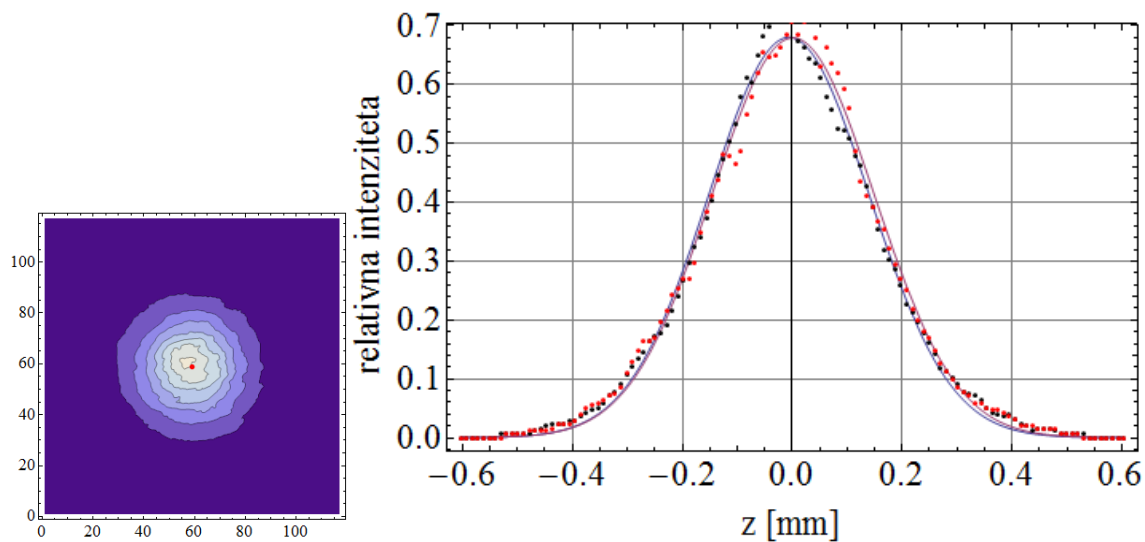
Tabela 5: iz slik pridobljeni vodoravni ter navpični polmeri snopov

Tok [A]	Črpalna moč [W]	r_{vod} [mm]	r_{navp} [mm]	$r_{\text{navp}} / r_{\text{vod}}$
4	2.94	0.321	0.323	0.994
5	3.73	0.292	0.296	0.986
6	4.54	0.229	0.238	0.966
7	5.35	0.219	0.216	1.012
8	6.16	0.192	0.193	0.995

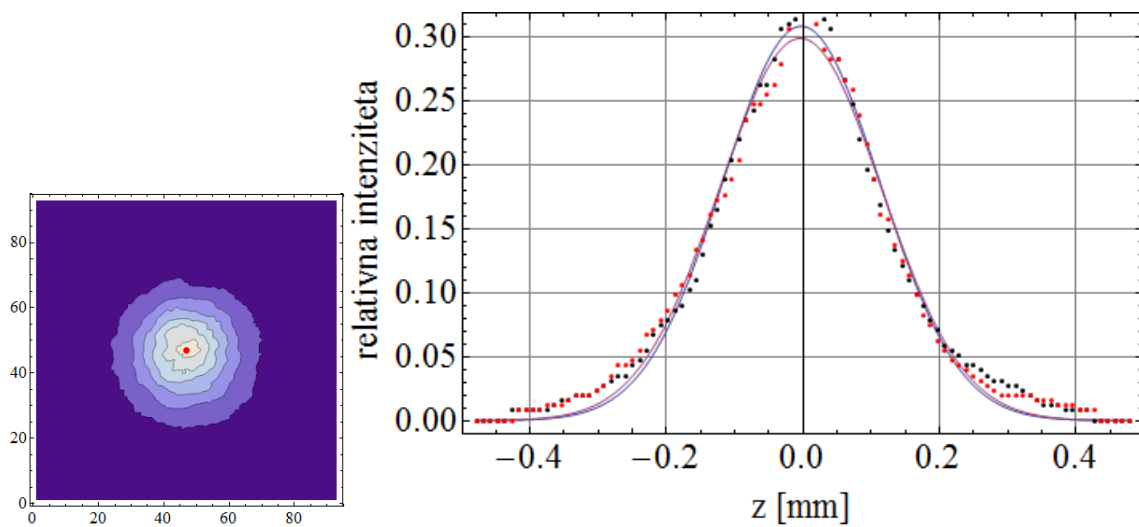
Avtor programa za obdelavo slik snopov je dr. Aleksej Majkić.



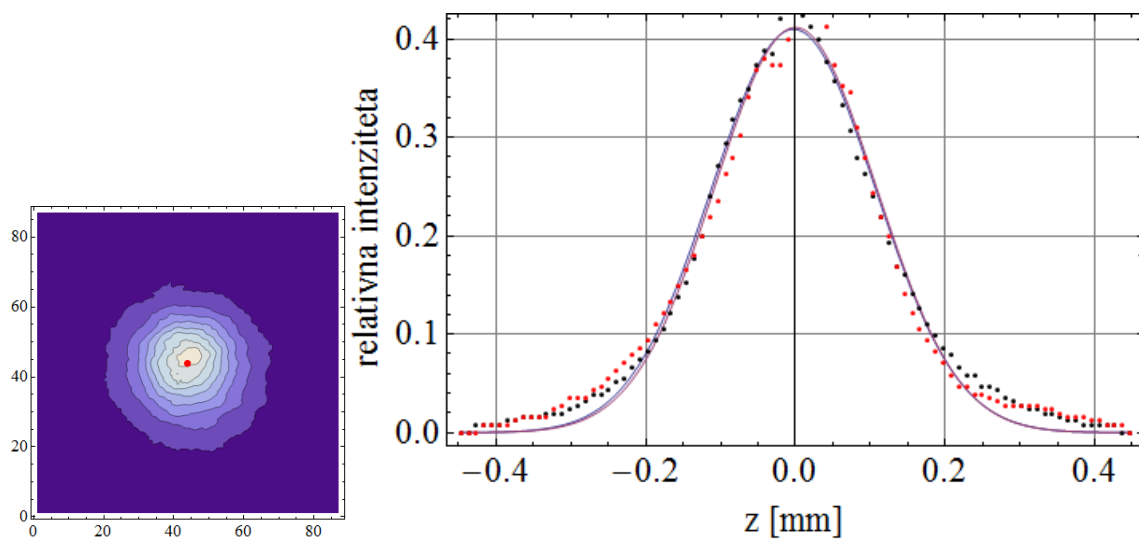
Slika 12: porazdelitev intenzitete svetlobe laserskega snopa pri črpalnem toku 4 A



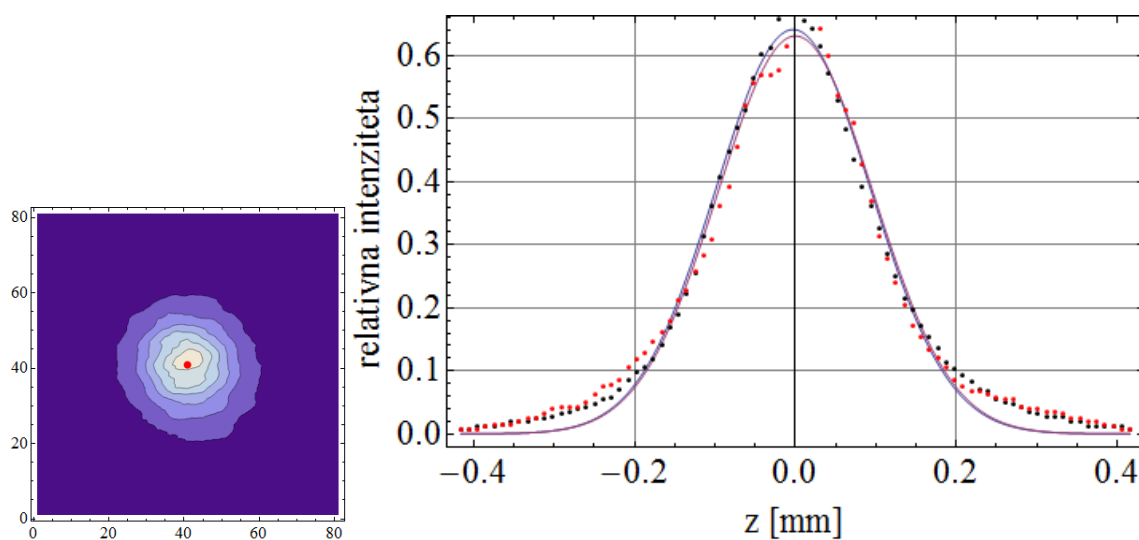
Slika 13: porazdelitev intenzitete svetlobe laserskega snopa pri črpalnem toku 5 A



Slika 14: porazdelitev intenzitete svetlobe laserskega snopa pri črpalnem toku 6 A



Slika 15: porazdelitev intenzitete svetlobe laserskega snopa pri črpalnem toku 7 A



Slika 16: porazdelitev intenzitete svetlobe laserskega snopa pri črpalnem toku 8 A

Pri višjih močeh je že opazno odstopanje prilagojene Gaussove krivulje od dejanskih podatkov, kar ima za posledico neskladnost z meritvami, pridobljenimi z metodo britvice.

SPREMINJANJE VALOVNE DOLŽINE IZHODNEGA LASERSKEGA SNOPA

Načini, s katerimi lahko spreminjamo valovno dolžino izhodne laserske svetlobe, so različni. V našem primeru smo za ta namen uporabili dvolomno ploščico iz kvarčnega stekla, ki je bila za Brewsterjev kot nagnjena glede os resonatorja.

Princip delovanja je sledeč. Nepolarizirana svetloba, ki vpada na kristal pod Brewsterjevim kotom, se delno polarizira. Odbiti delež je polariziran pravokotno na vpadno ravnino žarka (TE, v našem primeru navpično polariziran), prepuščeni delež pa je delno polariziran saj svetloba s TM polarizacijo nemoteno potuje skozi ploščico. Pojav dvolomnosti opisuje razdelitev vpadnega žarka na dva dela v anizotropnih snoveh. Razdvojena žarka imata v splošnem medsebojno ortogonalni polarizaciji, ter se v enosnih kristalih lomita z dvema lomnima količnikoma, n_o in n_e . Zaradi različnih optičnih poti se med žarkoma pojavi fazna razlika δ , ki je odvisna od kota θ med optično osjo kristala ter smerjo žarka v kristalu, kota med normalo na površino kristala ter vpadnim žarkom α (v našem primeru Brewsterjev kot), in debelino kristala h ([1], poglavje 5.6)

$$\delta = \frac{2\pi h(n_o - n_e) \sin^2 \theta}{\lambda \sin \alpha} \quad (6)$$

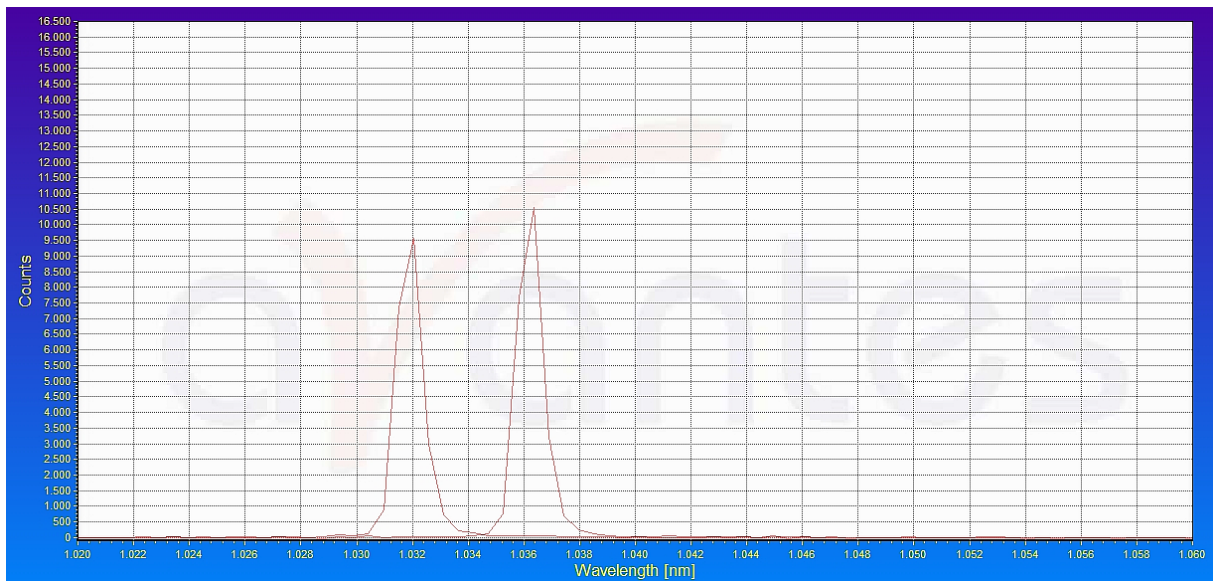
Površini kristala, postavljeni pod Brewsterjevim kotom glede na vpadni žarek, delujeta kot nekakšna filtra za vertikalno polarizacijo. Če se fazna razlika med žarkoma po poti skozi kristal spremeni za celoštevilski večkratnik 2π radianov, se prvotna polarizacija žarka po prehodu skozi prvo ploskev ne spremeni, tako, da mu ob srečanju z izhodno ploskvijo na povratni poti le-ta ne predstavlja nobenih polarizacijskih izgub. Ta pogoj je ob danem kotu φ med vpadno ravnino in optično osjo izpolnjen samo za določeno valovno dolžino. S sukanjem dvolomne ploščice okrog ploskovne normale (spreminjanjem kota φ) lahko torej do neke mere izbiramo, katero valovno dolžino laserske svetlobe bomo ojačevali.

Območje, v katerem lahko spreminjamo valovno dolžino, je v odločilni meri odvisno od laserskega medija, v našem primeru je to Yb:YAG kristal. V resonatorju se hkrati ojačuje veliko število stoječih valovanj z različnimi valovnimi dolžinami. Pri katerih valovnih dolžinah pa lahko pride do stimulirane emisije je odvisno od ojačitvenega okna kristala. Pri centralni valovni dolžini laserske emisije, ki je v našem primeru pri Yb:YAG kristalu $\lambda_i = 1030$ nm, je ojačevalno okno široko približno $\Delta\lambda = 30$ nm [6] pri okoli 10% vršne ojačitve, kar ponuja dobre možnosti selekcije izhodne valovne dolžine laserja.

Spreminjanje valovne dolžine laserja je bilo opravljeno pri dveh vrednostih odbojnosti izhodnih zrcal, $R_1 = 0.54$ in $R_2 = 0.99$. Ostali parametri se med meritvami niso spreminjali. Spektrometer smo najprej testirali na znani valovni dolžini He-Ne laserja, ki je 632.8 nm. Izmerjena vrednost je znašala 636.8 nm. Idealno bi bilo spektrometer umeriti na svetlobi z valovno dolžino blizu 1030 nm, vendar je za naš popravek ta meritev zadoščala.

Mejni dosegljivi valovni dolžini pri odbojnosti izhodnega zrcala $R_1 = 0.54$ sta bili $\lambda_1 = 1028$ nm in $\lambda_2 = 1032.5$ nm, kar da širino območja nastavljalivosti frekvence približno $\Delta\lambda = 4.5$ nm.

Spodnja slika prikazuje obe skrajni valovni dolžini (prave valovne dolžine so za približno 4 nm krajše). Posamezna spektra sta bila združena na eno sliko.

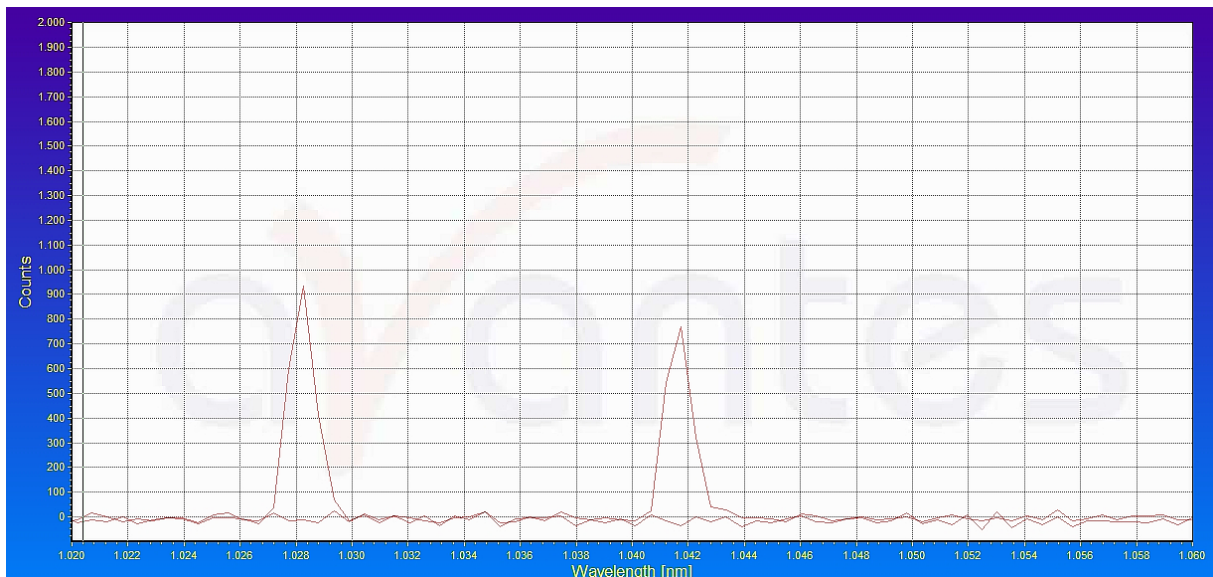


Slika 17: skrajni valovni dolžini laserja pri ogledalu z odbojnostjo $R_1 = 0.54$

Pri izhodnem zrcalu z vrednostjo odbojnosti $R_2 = 0.99$ so bili rezultati drugačni. Nižja skrajna valovna dolžina je znašala $\lambda_1 = 1024$ nm, višja pa $\lambda_2 = 1038$ nm, kar da za $\Delta\lambda = 14$ nm.

Razliko v intervalu izbire valovnih dolžin si lahko razlagamo z močno povečanim energijskim tokom znotraj resonatorja pri zrcalu z višjo odbojnostjo. Pri tem se ojačujejo tudi valovne dolžine laserske svetlobe dlje od vrha emisijskega spektra, ki se v nasprotnem primeru zaradi prevelikih izgub ne.

Spodnja združena spektra prikazujeta mejni valovni dolžini pri višji odbojnosti izhodnega zrcala. Viden je padec v intenziteti svetlobe pri obeh valovnih dolžinah v primerjavi z manj odbojnim ogledalom.



Slika 18: skrajni valovni dolžini laserja pri ogledalu z odbojnostjo $R_2 = 0.99$

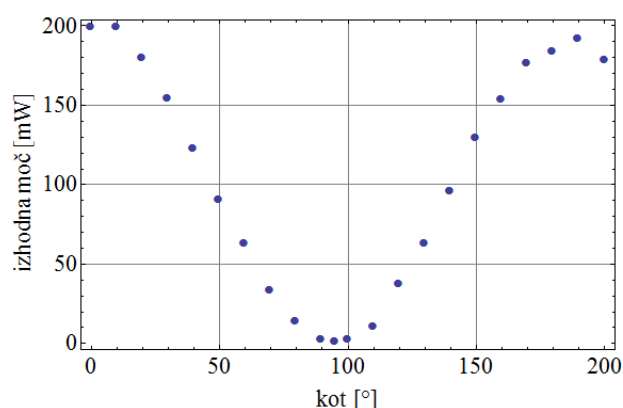
Moči pri različnih valovnih dolžinah so za obe odbojnosti zrcal podane v tabeli 6.

Tabela 6: izmerjene moči laserskega snopa v odvisnosti od odbojnosti izhodnega zrcala ter valovne dolžine

λ [nm] R	1024	1028	1030	1032	1038
0.54	/	534 mW	760 mW	580 mW	/
0.99	150 mW	ni izmerjeno	ni izmerjeno	250 mW	225 mW

Meritev polarizacije izhodne laserske svetlobe z vstavljenim dvolomnim elementom se skladajo s predpostavko, da površina dvolomnega kristala (njena normala se nahaja v vodoravni ravnini), nagnjena za Brewsterjev kot proti vpadnemu žarku, odbija vertikalno polarizirano svetlobo.

Slika 21 prikazuje meritev polarizacije snopa pri odbojni vrednosti zrcala $R_2 = 0.99$. Kot 0° predstavlja prepustno lego analizatorja v vodoravni ravnini.



Slika 19: meritev polarizacije svetlobe ob prehodu skozi dvolomno ploščico

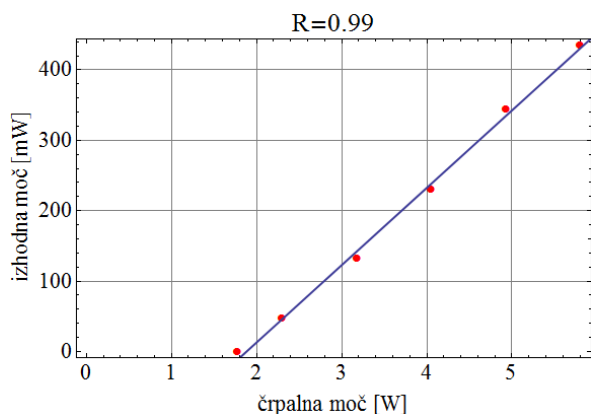
Razmerje med moči navpično ter vodoravno polarizirane svetlobe je $\eta = 0.01$. Brez dvolomnega filtra je laserski snop v veliki meri nepolariziran, razmerje je tedaj $\eta = 0.82$.

MERITEV LASERSKE MOČI V ODVISNOSTI OD REFLEKTIVNOSTI IZHODNEGA ZRCALA

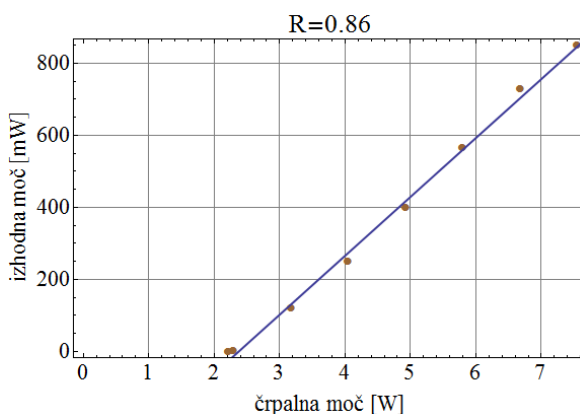
Moč izhodnega laserskega snopa pri določeni črpalni moči diode je v veliki meri odvisna tudi od izbire odbojnosti izhodnega zrcala. Pri višjih vrednostih odbojnosti pride do laserske ojačitve v resonatorju pri nižjih črpalnih močeh kot pa pri nižjih odbojnih vrednostih, vendar je energijski tok znotraj resonatorja znatno večji, kar lahko privede do poškodb komponent. Podamo lahko zvezo med izhodno močjo laserja P_{izh} in gostoto energijskega toka znotraj resonatorja, ki približno velja za visoke odbojnosti izhodnega zrcala ([1], poglavje 3.4.2)

$$P_{izh} = AI \left(\frac{1-R}{1+R} \right) \quad (7)$$

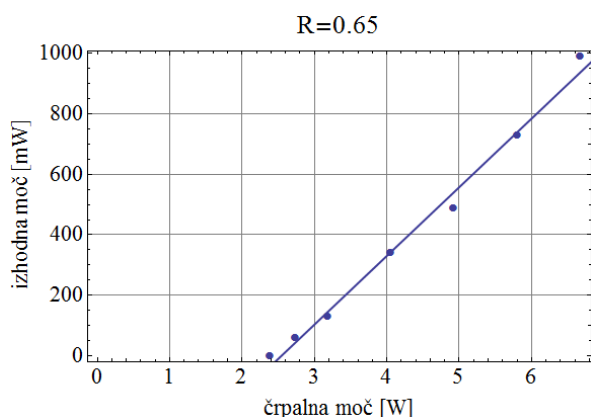
I predstavlja gostoto energijskega toka znotraj resonatorja, $A = 0.02 \text{ mm}^2$ površino snopa na kristalu, $R = 0.99$ odbojnost izhodnega zrcala, $P_{izh} = 0.435 \text{ W}$ pa izhodno moč laserja. Pri teh podatkih dobimo za vrednost energijskega toka, krožečega po resonatorju $I = 4.3 \text{ kWmm}^{-2}$, kar pomeni, da na kristal vpada moč $P_k = 86 \text{ W}$. V spodnjih grafih je prikazana moč laserskega snopa v odvisnosti od moči črpalne svetlobe za štiri različne vrednosti odbojnosti zrcal.



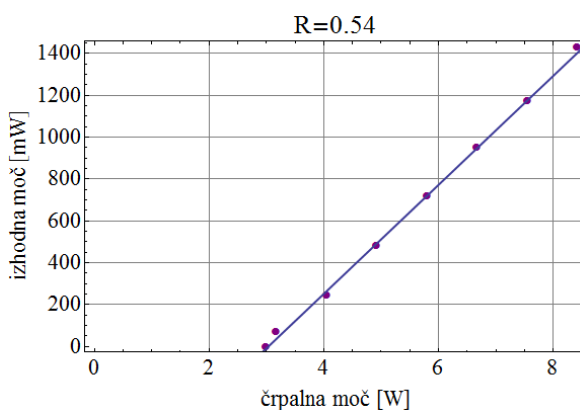
Slika 20: izhodna moč v odvisnosti od črpalne pri $R=0.99$



Slika 21: izhodna moč v odvisnosti od črpalne pri $R=0.86$



Slika 22: izhodna moč v odvisnosti od črpalne pri $R=0.65$



Slika 23: izhodna moč v odvisnosti od črpalne pri $R=0.54$

V naslednji tabeli so prikazani koeficienti nad pragom pridobljene laserske moči glede na 1 W črpalne moči.

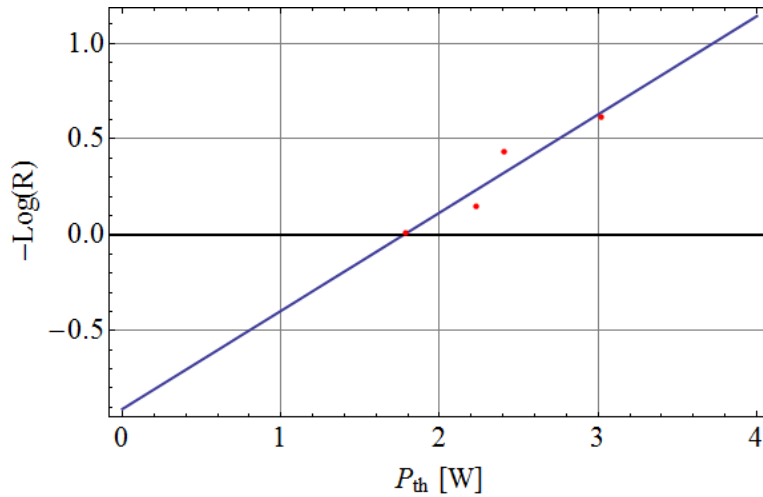
Tabela 7: koeficienti nad pragom pridobljene laserske moči v odvisnosti od odbojnosti izhodnega zrcala

Odbojnost zrcala	0.99	0.86	0.65	0.54
k	0.110	0.163	0.227	0.260

Iz opravljenih meritev lahko ocenimo izgube v resonatorju ter faktor ojačanja. Meja delovanja laserja je z odbojnostmi izhodnih zrcal za kvazi-trinivojski sistem Yb:YAG povezana preko naslednje zveze ([1], poglavje 3.4.2)

$$-\ln(R) = KP_{th} - (\delta + \delta_s) \quad (8)$$

R predstavlja reflektivnost izhodnega zrcala, K je sorazmernostni faktor, P_{th} črpalna moč na pragu laserskega delovanja, zadnja dva člena pa predstavljata skupne izgube pri enem obhodu žarka skozi resonator. Spodnji graf prikazuje linearno zvezo med zgornjimi količinami



Slika 24: mejne moči črpalne svetlobe, potrebne za delovanje laserja v odvisnosti od odbojnosti zrcal

Presečišče premice z ordinatno osjo nam poda vrednost skupnih izgub na meji delovanja $\delta + \delta_s = 0.909$. Po ([1], poglavje 3.4.2) velja tudi zveza

$$2g_0l = KP_{in}, \quad (9)$$

kjer je g_0 faktor ojačitve žarka na pragu delovanja, l dolžina ojačevalnega medija (Yb:YAG), P_{in} pa črpalna moč. Iz premice izračunana vrednost K znaša $K = 0.513 \text{ W}^{-1}$, kar pri vhodni moči $P_{in} = 3.02 \text{ W}$ in dolžini kristala $l = 0.5 \text{ cm}$ poda koeficient ojačitve na meji delovanja $g_0 = 1.54 \text{ cm}^{-1}$. Pri maksimalnem črpanju z našo lasersko diodo $P_{in} = 8.4 \text{ W}$ je koeficient ojačitve $g_0 = 4.2 \text{ cm}^{-1}$. Optimalno zrcalo za ta primer je podano z ([1], poglavje 3.4.2)

$$-\ln(R_{opt}) = \left(\sqrt{\frac{2g_0l}{\delta + \delta_s}} - 1 \right) (\delta + \delta_s) \quad (10)$$

iz česar dobimo $R_{opt} = 0.35$. Zelo majhna optimalna odbojnost zrcala je posledica zelo velikih notranjih izgub v laserju.

REZULTATI

Maksimalna dosežena laserska moč je brez uporabe dvolomne ploščice znašala 1.43 W pri črpalni moči 8.44 W z uporabo 54 odstotno odbojnega izhodnega zrcala, ki se je v naših meritvah izkazalo kot tudi najbolj optimalno. Izmerjen faktor divergence snopa M^2 je bil v celotnem razponu moči zelo blizu 1, kar nakazuje na precejšnjo neobčutljivost danega laserskega resonatorja na termično lečenje kristala. Opažen frekvenčni razpon laserske svetlobe je bil največji pri uporabi 99 odstotno odbojnega izhodnega zrcala, in je znašal približno 14 nm.

Izkoristek črpalne moči bi lahko povečali z močnejšim hlajenjem kristala in drugačno postavitvijo samega resonatorja. Izkoristek črpalne svetlobe se v kristalu z nižanjem temperature namreč znatno poveča [2], kar je bilo opazno tudi pri naših meritvah – pri višjih črpalnih močeh se je laserska moč s časom vztrajno nižala, kar je posledica gretja kristala in omejitev hladilnega sistema. Pri ponovni postavitvi laserskega resonatorja bi skušali uporabiti zrcala konkavne oblike, kar bi odpravilo potrebo po uporabi fokusne leče znotraj resonatorja. Le-ta predstavlja še en element, na katerem se nekaj svetlobe absorbira, ter tako izgubi.

Širok frekvenčni razpon je terjal svoj davek v izhodni moči laserja. Povprečna moč laserskega snopa se je tako ob uporabi 99 odstotno odbojnega zrcala v frekvenčnem območju gibala okrog 200 mW. Znatno višje moči je ponujala uporaba 54 odstotno odbojnega zrcala, pri katerem je bil dosegljiv frekvenčni interval približno 3 krat manjši.

- [1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Great Falls: Springer Series in Optical Sciences, 2006.
- [2] T. Y. F. e. al., „Cryogenic Yb³⁺-Doped Solid-State Lasers,“ *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Izv. 13, št. 3, pp. 448-459, 2007.
- [3] A. Sennaroğlu, *Photonics and Laser Engineering: Principles, Devices and Applications*, Istanbul: McGraw-Hill, 2010.
- [4] A. E. Siegman, „Defining, measuring ,and optimizing laser beam quality,“ v *Proc. SPIE 1868, Laser Resonators and Coherent Optics: Modeling, Technology, and Applications*, Los Angeles, 1993.
- [5] R. Paschotta, „RP Photonics Encyclopedia,“ RP Photonics, 2007. [Elektronski]. Available: http://www.rp-photonics.com/m2_factor.html. [Poskus dostopa 9 2014].
- [6] W. F. Krupke, „Ytterbium Solid-State Lasers—The First Decade,“ *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, Izv. 6, št. 6, pp. 1287-1296, 2000.