

Funkcija i održavanje lasera s tvrdom jezgrom

Črpič, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:404337>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Veleučilište u Karlovcu

Strojarski odjel

Stručni studij Mehatronike

Filip Črpič

**FUNKCIJA I ODRŽAVANJE LASERA S
TVRDOM JEZGROM**

Završni rad

Karlovac, veljača 2018.

Veleučilište u Karlovcu

Strojarski odjel

Stručni studij Mehatronike

Filip Črpič

**FUNKCIJA I ODRŽAVANJE LASERA S
TVRDOM JEZGROM**

Završni rad

Mentor: dr. sc. Vladimir Tudić

Karlovac, veljača 2018.

Karlovac University of Applied Sciences

Mechanical Engineering Department

Professional undergraduate study of Mechatronics

Filip Črpič

**SOLID STATE PERFORMANCE AND
MAINTENANCE**

Final paper

Karlovac, February 2018.

Predgovor

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad na temu „Funkcija i održavanje lasera s tvrdom jezgrom“ izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje koje sam stekao tijekom studija, uz vodstvo mentora dr.sc Vladimira Tudića, prof.v.š. kojem se ovim putem zahvaljujem.

Zahvala

Zahvaljujem se svojim roditeljima na nesebičnoj pomoći i pruženoj potpori tijekom ovih godina studiranja.

Filip Črpič



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Trg J.J.Strossmayera 9

HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 – 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij: STROJARSTVO
Usmjerenje: MEHATRONIKA

Karlovac, 07. Prosinac 2017

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Filip Črpič

Matični broj: 0112613034

Naslov: **FUNKCIJA I ODRŽAVANJE LASERA S TVRDOM JEZGROM**

Opis zadatka:

Za potrebe završnog rada u teoretskom dijelu opisati funkciju nekoliko tipova lasera s tvrdom jezgrom te naznačiti dijelove - elemente sustava i svojstva. U eksperimentalnom dijelu rada naznačiti postupak niveliranja lasera s i bez kolimatora, niveliranje sakupljača zraka lasera, umjeravanje te mjerenje snage.

Koristiti stručnu literaturu, tehničke propise, dokumentaciju proizvođača opreme. Redovito održavati konzultacije s mentorom te rad uskladiti s Pravilnikom o pisanju završnih i diplomskih radova Veleučilišta u Karlovcu.

Zadatak zadan:

07.12.2017

Rok predaje rada:

15.02.2018

Predviđeni datum obrane:

22.02.2018

Mentor:

Dr. Sc. Vladimir Tudić, prof. V.š.

Predsjednik ispitnog
povjerenstva:

Mr. Sc. Vedran Vyroubal, v. Pred.

SADRŽAJ

Contents

SADRŽAJ	I
SAŽETAK.....	III
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
1. UVOD	1
2. TEORETSKI DIO.....	2
2.1. POVIJEST	2
2.2. SVOJSTVA LASERSKE ZRAKE	3
2.2.1. KOHERENTNOST.....	3
2.2.2. USMJERENOST	4
2.2.3. MONOKROMATIČNOST.....	4
2.2.4. KARAKTERISTIKE LASERA.....	4
2.3. GRAĐA LASERA	6
2.3.1. LASERSKA PUMPA	6
2.3.1.1. OPTIČKA PUMPA.....	6
2.3.1.2. ELEKTRIČNA PUMPA	8
2.3.2. LASERSKI MEDIJ	8
2.3.3. OPTIČKI REZONATOR.....	9
2.4. NAČIN RADA	10
2.4.1. SUSTAV S TRI STANJA	10
2.4.2. SUSTAV S ČETRI STANJA	11
2.5. LASERI SA ČVRSTOM JEZGROM	12
2.5.1. RUBINSKI LASER	13
2.5.2. NEODIMSKI LASERI	14
2.5.2.1. Nd:YAG	14
2.5.2.2. Nd:STAKLO	14
2.5.2.3. Nd:YLF I Nd:YVO ₄	14
2.5.3. ERBIUMSKI LASER	16
2.5.3.1. Er:YAG	16
2.5.3.2. Er:STAKLO	17
2.5.4. PODESIVI LASERI	17

2.5.4.1.	Ti:SAFIR	18
2.5.4.2.	ALEKSANDRIT	18
2.6.	KOLIMATOR	19
3.	EKSPERIMENTALNI DIO	20
3.1.	NIVELIRANJE LASERA BEZ KOLIMATORA	20
3.2.	NIVELIRANJE LASERA S KOLIMATOROM	23
3.3.	NIVELIRANJE SAKUPLJAČA ZRAKE	25
3.4.	MJERENJE SNAGE	28
3.5.	UMJERAVANJE	29
4.	ZAKLJUČAK	31
5.	LITERATURA	32
PRILOG 1	33
PRILOG 2	34
PRILOG 3	35

SAŽETAK

Od prvog izuma rubi lasera 1960. godine pa do danas laseri se primjenjuju skoro u svim područjima našeg života. Nalaze se u komercijalnim, medicinskim, industrijskim i vojnim uređajima.

Postoje različite podjele lasera, a najpoznatija podjela je po agregatnom stanju u kojoj se laseri dijele na lasere s tvrdom jezgrom, plinske i poluvodičke lasere.

Po građi laseri se nisu previše promijenili, ali svake godine s istraživanjem se pronalaze novi materijali pogodni za rad lasera i njihova nova primjena. Optički dijelovi se lagano mogu oštetiti u doticaju prašine ili nečistoće i laserske zrake koja se može spriječiti redovitim održavanjem.

Ključne riječi: Laser s tvrdom jezgrom, Er:YAG, održavanje

SUMMARY

Since the first invention of the ruby laser in 1960 until now laser are used in almost all areas of our life. We can find them in commercials, medical, industrial and military devices.

There are different divisions of laser and the most common is in aggregate state in which lasers are divided on solid-state laser, gas and semiconductor lasers.

Structure of laser didn't change a lot, but every year there are new findings in research where new materials are found for laser application and theirs new usage. Optical parts can get damaged easily in contact with dust or contaminations with laser beam which can be resolved with regular maintenance.

Key words: Solid-state laser, Er:YAG, maintenance

POPIS SLIKA

Slika 1. Predodžba Ruby lasera i Helium-Neon lasera. Izvor: http://www.hrl.com/lasers/lsr_maser.html ; https://physics.aps.org/story/v26/st24	2
Slika 2. Predodžba koherentnosti svjetlosti lasera. Izvor: Understanding Lasers,93	3
Slika 3. Predodžba: (a) bljeskalica, (b) elektrolučne bljeskalice. Izvor:	7
Slika 4. Predodžba diodne pumpe. Izvor: https://www.newport.com/t/laser-diode-technology	7
Slika 5. Predodžba Er:YAG laserskog medija. Izvor: http://www.scientificmaterials.com/products/er-yag.php	8
Slika 6. Predodžba rezonatora, laserskog medija i pumpe. Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_construction	9
Slika 7. Predodžba: (a) ravno paralelni rezonator, (b) koncentrični rezonator, (c) konfokalni rezonator. Izvor: Principle of laser, 165	9
Slika 8. Predodžba sustava s tri stanja. Izvor: Solid-State Laser Engineering,18.....	11
Slika 9. Predodžba sustava s četiri stanja. Izvor: Solid-State Laser Engineering,19	11
Slika 10. Predodžba valnih duljina Nd:LYF. Izvor: lasera solid state engenering str 61	15
Slika 11. Predodžba grafikona ulaznih i izlavnih energija Er:YAG lasera. Izvor:	16
Slika 12. Predodžba građe kolimatora. Izvor: http://www.inframet.com/ir_collimators.htm ...	19
Slika 13. Predodžba optičkog rezonatora MCL31 lasera.....	20
Slika 14. Predodžba postolja i kućišta laserske pumpe i medija.....	20
Slika 15. Predodžba oštećenog laserskog medija.....	21
Slika 16. Predodžba a) mehanizma za nivelaciju, b) postolje zrcala	21
Slika 17. Predodžba ne niveliranog lasera	22
Slika 18. Predodžba nivelirane laserke zrake.....	22
Slika 19. Predodžba kolimatora i paralelnog stakla	23
Slika 20. Predodžba zaglavljene zatvarača	24
Slika 21. Predodžba točka fokusa optičkog rezonatora na okularu kolimatora	24
Slika 22. Predodžba niveliranog optičkog rezonatora na okularu kolimatora	25
Slika 23. Predodžba ne niveliranog sakupljača zraka na okularu kolimatora.....	25
Slika 24. Predodžba postolja za testiranje sakupljača zraka sa ciljnikom na izlazu iz lasera	26
Slika 25. Predodžba ciljnika montiranog na zglobnu ruku za testiranje sakupljača zrake	26
Slika 26. Predodžba ispravnog niveliranja sakupljača zrake	27
Slika 27. Predodžba umjeravanja i mjerenja snaga.....	28
Slika 28. Predodžba postavka lasera za provjeru snaga	28
Slika 29. Predodžba postavke za umjeravanje	29
Slika 30. Predodžba minimalne i maksimalne snage.....	29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Predođba vrsta lasera s odgovarajućom valnom duljinom. Izvor: Introduction to Laser Technology,191	5
Tablica 2. Predođba svojstva rubinskog lasera. Izvor: Understanding lasers, 236	13
Tablica 3. Predođba Nd:YAG harmonikaa. Izvor: Understanding lasers,239	14
Tablica 4. Predođba svojstva Nd:YLF i Nd:YVO4 lasera Izvor: Solid-State Laser Engineering,77	15
Tablica 5. Predođba svojstva Er:YAG lasera. Izvor: http://www.sintecoptronics.com/CrystalErYAG.asp	16
Tablica 6. Predođba podesivih lasera sa odgovarajućom valnom duljinom. Izvor: Understanding laser,243	17
Tablica 7. Predođba svojstva Aleksadrit lasera. Izvor: Principle of lasers,393	18
Tablica 8. Predođba parametra za umjeravanje i njihova energija.....	30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
c	Brzina svjetlosti u vakuumu	299 792 458 m/s
θ	divergencija	
λ	Valna duljina	nm
R	Promjer	mm
P	Snaga	W
L	duljina	mm
N	Broj atoma	
T	temperatura	$^{\circ}\text{C}$
k	Boltzmanova konstanta	8.6 eV/kelvin
Nd	Neodimium	
YAG	Itrij-aluminijev granat	
YLF	Itrij-litrijev florid	
YVO ₄	Itrijev vandat	
Er	erbium	
Ti	Titanium	

1. UVOD

Pojam LASER dolazi od akronima („Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“) svjetlosno povećanje stimuliranom emisijom zračenja. Laser je uređaj koji emitira svjetlost kroz proces povećanja na bazi stimulacije emisije fotona. Emitirana zraka svjetlosti lasera je najčešće vidljiva zbog visokog stupnja prostorne i vremenske kohezije.

U nastavku je opisan istraživačko - eksperimentalni rad u kojem je korištenjem znanja stečenim tijekom studiranja i istraživanjem, prikazan je način godišnjeg održavanja Er:YAG lasera. Na početku rada ukratko su opisani osnovni pojmovi o laserima u kojim se upoznajemo sa poviješću i nastankom lasera. U nastavku je opisana građa, princip rada i vrste lasera uz pomoć čega dolazimo do osnovnih znanja potrebnih za održavanje i popravak lasera s tvrdom jezgrom.

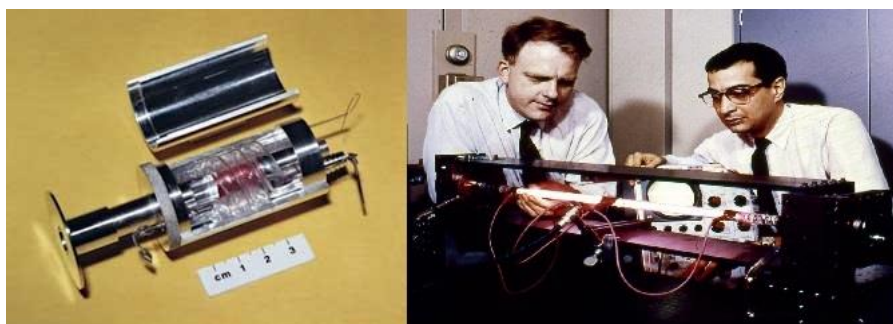
Cilj ovog rada bio je prikazati godišnje održavanje lasera s tvrdom jezgrom koje se sastoji od nivelacije laserske zrake s i bez kolimatora i sakupljača zraka, mjerenje i umjeravanja snaga.

2. TEORETSKI DIO

2.1. POVIJEST

Albert Einstein je 1917. godine u svojem radu „On the Quantum Theory of Radiation“ iznio teorijske temelje masera i u budućnosti lasera. Laser i maser su slični uređaju koji se razlikuju u izlaznom stanju. Pomoću masera se dobivaju mikrovalovi, a s laserom elektromagnetski valovi u vidljivom i infracrvenom dijelu spektra. Na konferenciji 1959. godine Gordon Gould je objavio članak „the LASER“ u kojem je spomenuo naziv LASER. Upotrijebio je sufiks „aser“ i prikladan prefiks l od „light“ što na engleskom znači svjetlo prilikom čega se dobiva „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“.

Prvi laser je napravio Theodore H. Maiman 16.05.1960. godine na sveučilištu u Kolumbiji. Laser je koristio tvrdu jezgru sintetičkog kristala rubina pobuđenog flash-lampom koji je proizvodio crvenu svjetlost na valnoj dužini od 694 nm. Laser je mogao samo raditi u pulsnom stanju jer je koristio sustav s tri stanja. Iste godine Iranski fizičari Ali Javan, William R. Bennett i Donald Herriott su izumili prvi plinski laser, koristili su helij i neon koji je mogao neprekidno raditi u infracrvenom dijelu spektra.



Slika 1. Predodžba Ruby lasera i Helium-Neon lasera. Izvor:
http://www.hrl.com/lasers/lsr_maser.html; <https://physics.aps.org/story/v26/st24>

Nick Holonak je demonstrirao prvi poluvodički laser 1962. godine kojem je bila vidljiva zraka, mogao je raditi samo u pulsnom stanju i kada je bio hlađen na -195°C . Diodni laser prvi je napravio Robert N. Hall iste godine kao Nick Holonak od galijeva arsenita koja je emitirala 850 nm zraku u bliskom infracrvenom dijelu spektra. Osam godina nakon Zhores Alferov, Izou Hayashi i Morton Panish samostalno su napravili diodni laser koji može raditi kontinuirano na sobnoj temperaturi.

2.2. SVOJSTVA LASERSKE ZRAKE

Osnovna svojstva bitne su sastavnice svojstava i funkcije rada uređaja koji koriste laserske zrake. Razlikujemo tri osnovna svojstva laserske zrake a to su:

- Koherentnost
- Usmjerenost
- Monokromatičnost

2.2.1. KOHERENTNOST

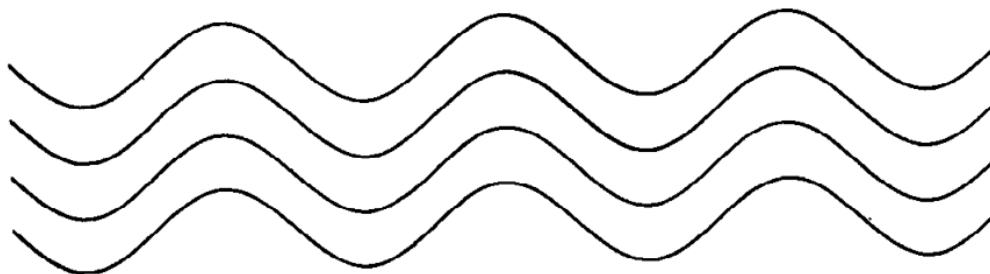
Koherentnost je jedno od najpoznatijih svojstva lasera, a to znači da svjetlost ima isti smjer, valnu duljinu i fazu koje se podudaraju. U stvarnosti kod lasera nije moguće dobiti savršenu koherentnost zato što je moguće da dođe do spontanijih pobuda koje nisu koherentne sa stimuliranom pobudom. Čak kod stimuliranih pobuda postoje male razlike u valnoj duljini koje tjeraju foton iz faze na velikim udaljenostima. (Hitz i sur., 2012).

Koherentnost se može izračunati pomoću formule:

$$\text{Koherentnost} = \frac{c}{2\Delta\nu} \quad (2.2.1)$$

Gdje je:

- c – brzina svjetlosti u vakuumu
- $\Delta\nu$ – širina pojasa bljeskalice izražena u frekvenciji.



Slika 2. Predodžba koherentnosti svjetlosti lasera. Izvor: *Understanding Lasers*, 93

2.2.2. USMJERENOST

Laserska zraka je usmjerena zato što je jako uska i gusto koncentrirane i ne rasipavaju se jako na velikim udaljenostima. Do divergencije dolazi jer laserska zraka mora više puta proći između dva zrcala koja omeđuju rezonator koji ne mogu biti idealno poravnana. Divergencija θ se računa po formuli:[2]

$$\theta = \frac{\beta * \lambda}{D} \quad (2.2.2)$$

Gdje je:

- θ – divergencija
- β – numerički koeficijent koji ovisi o distribuciji amplitude
- λ – valna duljina zrake
- D – promjer (dijametar) zrake

2.2.3. MONOKROMATIČNOST

Monokromatičnost zrake je jedinstvena osobina temeljena na fizikalnim osobinama zrake. Laserska zraka je monokromatična jer ima jednu valnu duljinu te sukladno tome i jednu boju.

2.2.4. KARAKTERISTIKE LASERA

U ovom dijelu teksta bit će naznačeno nekoliko osnovnih ali i karakterističnih parametara lasera. Osnovne karakteristike lasera su:

- Snaga P :

Postoje dvije razine snaga lasera a to su:

- Izlazna snaga,
- Snaga unutar rezonatora.

Snaga unutar rezonatora je stimulirana emisija generirana unutar lasera koja se odbija naprijed, nazad između laserskih zrcala. Svakim prolaskom propusnim zrcalom svjetlost je propuštena izlaznoj zraci. Ako se propušta npr. 50% zraka propusnim zrcalom izlazna snaga će biti duplo slabija od snage unutar rezonatora.

Snaga se najčešće mjeri u vatima što je količina energije koja protječe kroz zraku. Kod pulsnog režima rada je teže izmjeriti vrijednost jer ista varira s vremenom. Zbog toga se u većini slučajeva mjeri više mjerenja i radi se prosječna vrijednost ili se gleda samo najveća vrijednost.[6]

- Valna duljina λ :

Valna duljina je obrnuto proporcionalna energiji u fotonima koji se dogodio putem inverzije napućenosti atoma. Drugim riječima valna duljina određuje snagu laserske zrake. Zanimarive

promjene valne duljine mogu se dogoditi u ovisnosti o tipu laserske pumpe i tipu režima rada lasera koja može biti konstantna ili pulsirajuća. (Hecht, 1994.)

U tablici 1 možemo vidjeti neke valne duljine za odgovarajući tip lasera.

Tablica 1. Predodba vrsta lasera s odgovarajućom valnom duljinom. Izvor: *Introduction to Laser Technology*, 191

Tip	Valna duljina
He-Cd	441.6 nm
Ruby	694.3 nm
Nd:YAG	946 nm
Ho:YAG	2080 nm
Er:YAG	2900 nm
Co ₂	10 600 nm

Nadalje, osnovne karakteristike lasera još su:

- Efikasnost η : Ovisi o omjeru uložene energije laserske pumpe i izlazne energije
- Vrijeme trajanje emisije τ : ovisi o strukturi materijala i označava vrijeme trajanja inverzije napučenosti atoma.

2.3. GRAĐA LASERA

Laser kao visoko tehnološko dostignuće moderne tehnologije sastoji se od mnoštva dijelova. Međutim, u ovom radu biti će naznačena samo one skupine koje indirektno sudjeluju u izravnoj funkciji stvaranja laserske zrake. Osnovni dijelovi lasera su:

- Laserska pumpa
- Laserski medij
- Optički rezonator

2.3.1. LASERSKA PUMPA

Laserska pumpa je zadužena za stvaranje energije kako bi se u laserskom mediju mogla dogoditi inverzija napučenosti atoma. Primarni cilj je da električnu energiju pretvore u svjetlosnu energiju. Najefikasnija laserska pumpa će napraviti najveće zračenje na valnoj duljini koja najbolje pobuđuje laserski medij i najmanje zračenje u svim drugim nekorisnim spektrima. Tijekom godina koristili su se mnoge vrste i načini upumpavanja, a glavne vrste laserskih pumpa mogu biti:

- Optička pumpa
- Električna pumpa

2.3.1.1. OPTIČKA PUMPA[4]

Optičke pumpe su izvor jake svjetlosti koje mogu raditi s različitim valnim duljinama u pulsnom ili stalnom režimu rada lasera. Iz tog razloga optičke pumpe su iznimno povoljne za korištenje kod lasera s tvrdom jezgrom. Najznačajnije optičke pumpe su bljeskalice, elektrolučne lampe i diode.

Bljeskalice koje se koriste za dobivanje inverzije napučenosti atoma, cilindričnog su izgleda i napravljena su tako da plazma u potpunosti popunjava cijev. Sastoji se od kvarcne cijevi ispunjene plinom, dvije elektrode koje su zalijepljene u omotnici. Standardne linearne lampe imaju stijenku debljine od 1 do 2 mm, dužine od 5 cm do 1 m i promjera 2 do 8 mm.

Najčešći plin u lampama je Xenon jer ima veći radijacijski učinak od drugih plinova i pritisak u lampi mora biti od 40 000 do 93 000 Pa pri sobnoj temperaturi. Anoda bljeskalice se sastoji od čistog Wolframa dok je katoda napravljena od kuglice poroznog Wolframa impregniranom kalcijevim-oksikom. Ta kuglica je pričvršćena na Wolframski hladnjak. (Svelto, 1998.)

Površina mora biti dovoljno velika da izdrži vršnu struju. Dizajn bljeskalice za lasere s čvrstom jezgrom uključuje optimalizaciju glavnih komponenta kao što su optika rezonatora, kućište pumpe lasera, napajanja i specifikacija lasera kao što su maksimalna i srednja snaga, energija po impulsu, dijametar, kvaliteta i divergencije zrake. Najčešći načini hlađenja bljeskalice su pod stlačenim ili slobodnim zrakom ili vodom. Prilikom korištenja tekućina kod hlađenja vanjskog

sloja bljeskalice može imati srednju snagu od $300\text{W}/\text{cm}^2$, dok kod hlađenja stlačenim zrakom bljeskalica ima srednju vrijednost od $40\text{W}/\text{cm}^2$. prilikom hlađenja bljeskalice slobodnim zrakom srednja vrijednost joj iznosi $5\text{W}/\text{cm}^2$.

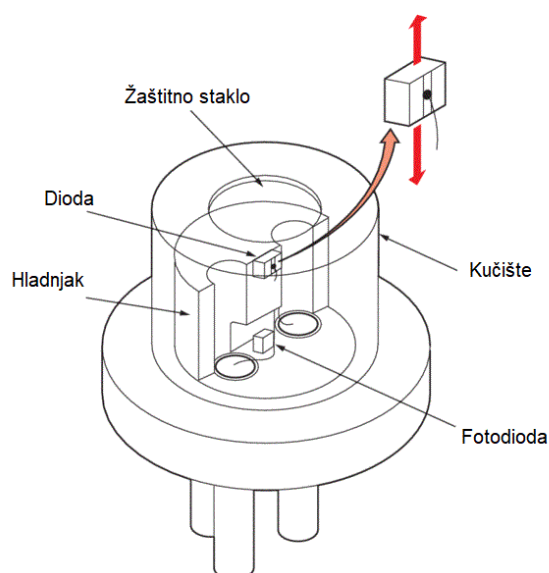
Elektrolučna lampa je po izgledu i načinu rada slična bljeskalici s razlikom u tome da katoda ima istaknut vrh za bolju elektrolučnu stabilnost. Kod punjenja elektrolučne lampe s kriptonskim plinom dolazi do dvostruko veće iskoristivosti nego kod xenon plina pri istim ulaznim snagama. (Svelto, 1998.)



Slika 3. Predodžba: (a) bljeskalica, (b) elektrolučne bljeskalice. Izvor:

Diode kao optička pumpa su sve zastupljenije zbog većeg koeficijent iskoristivosti zato što dioda radi na malim voltažama, izdržljiva je, smanjena su termalna opterećenja laserskog medija i pojačava frekvenciju u pulsnoj režimu rada lasera. Zbog manjih termalnih opterećenja laserska zraka je kvalitetnija.

Dioda ima vijek trajanja od 10 000 sati u stalnom režimu rada i/ili 10^9 impulsa u pulsnoj režimu rada dok bljeskalice imaju vijek trajanja od samo 200 sati i/ili 10^7 impulsa. (Koechner, 1992)



Slika 4. Predodžba diodne pumpe. Izvor: <https://www.newport.com/t/laser-diode-technology>

2.3.1.2. ELEKTRIČNA PUMPA

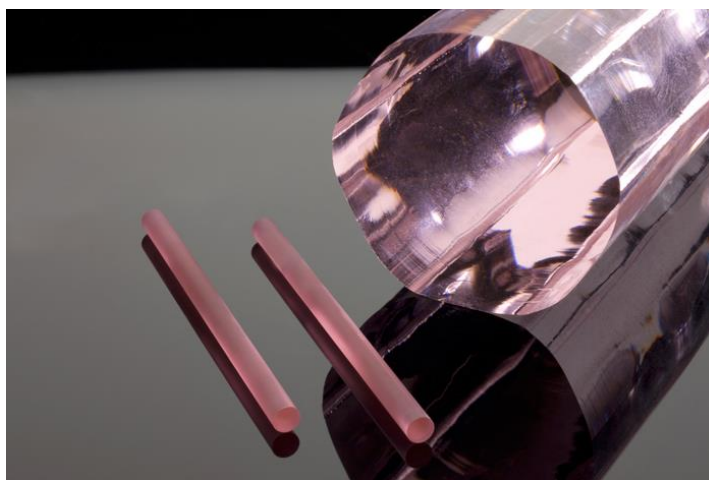
Električne pumpe se koriste za plinske i poluvodičke lasere. Električno podizanje može biti kontinuirano, frekventno ili pulsno koje prolazi kroz smjesu plina. Struja može prolaziti uzduž laserske cijevi ili poprečno.

Za uzdužno pražnjenje elektrode imaju prstenastu strukturu dok katoda ima veću površinu zbog velikog sudara teških iona. Mogu se koristiti se samo za kontinuirani rad. U slučaju poprečnog pražnjenja elektroda se nalazi preko cijele površine laserskog medija, a na drugoj strani svaka elektroda mora biti glatko zakrivljena. (Koechner, 1992)

2.3.2. LASERSKI MEDIJ

Laserski medij je najvažniji dio laserskog sustava. Mora imati način na koji se energija može proslijediti u medij i iz njega prenijeti u lasersku zraku s odgovarajućom valnom dužinom i snagom. Slika 5 prikazuje Er:YAG laserski medij u cilindričnom obliku

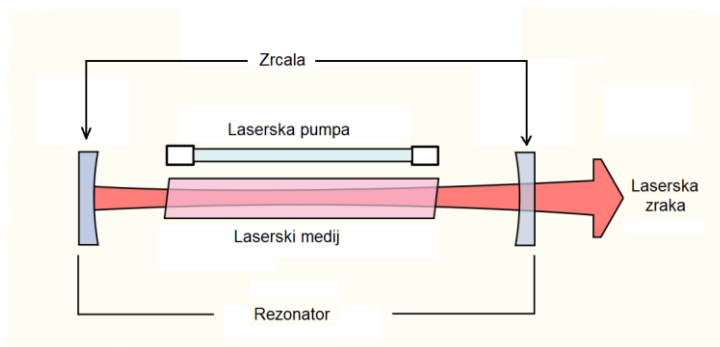
Može biti u tekućem, plinovitom i čvrstom stanju. Medij mora imati kontroliranu čistoću, oblik i veličinu i mora zadovoljiti kriterije za stvaranje inverzije napučenosti atoma. Kod lasera s tvrdom jezgrom laserski medij ima cilindrični i pločasti oblik. Promjer cilindričnog medija može biti od 2-12 mm dužine do 20 cm.[6]



Slika 5. Predodžba Er:YAG laserskog medija. Izvor: <http://www.scientificmaterials.com/products/er-yag.php>

2.3.3. OPTIČKI REZONATOR

Rezonator je dio lasera koji sadržava dva paralelna zrcala. Ima važnu ulogu u generiranju izlazne zrake. Pruža veliku usmjerenost laserske zrake i povećanja učinkovitosti u laserskom mediju koja se izgubi zbog apsorpcije i raspršivanja fotona unutar laserskog medija i greška na ogledalima. Da bi laser mogao kontinuirano raditi rezonator mora udovoljiti uvjetima da laserski medij i pumpa omoguće stimulirane, a ne spontane emisije.[4]



Slika 6. Predodžba rezonatora, laserskog medija i pumpe. Izvor: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_construction

Između rezonatora su laserski medij i pumpa. Na jednom kraju je zrcalo visokog stupnja refleksije dok je na drugom kraju djelomično reflektirajuće ili prijenosno zrcalo vidljivo na slici 6.

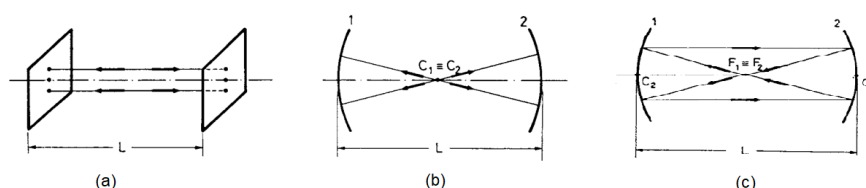
Postoje puno izvedbi rezonatora a neke najvažnijih su:[6]

- Ravno-paralelni rezonator sastoji se od dva ravna zrcala koja su međusobno paralelna (slika 7a). (Svelto, 1998.)
- Koncentrični rezonator sastoji se od dva sferna zrcala koja imaju isti promjer R i udaljena su na duljini L kao npr. na formuli 3.1 tako da se centri zakrivljenosti C_1 i C_2 podudaraju u istoj točki (slika 7b). (Svelto, 1998.)

$$L = 2R \quad (2.3.1)$$

- Konfokalni rezonator sastoji se od dva sferna zrcala koja imaju isti promjer R i udaljena su na duljini L kao npr. na formuli 4.2 tako da su fokusi F_1 i F_2 podudaraju u istoj točki (slika 7c). Iz toga slijedi da su centri zakrivljenosti C_1 i C_2 u sredini zrcala. (Svelto, 1998.)

$$L = 2F \quad (2.3.2)$$



Slika 7. Predodžba: (a) ravno paralelni rezonator, (b) koncentrični rezonator, (c) konfokalni rezonator. Izvor: Principle of laser, 165

2.4. NAČIN RADA

Laser mora moći napraviti stimuliranu emisiju kojoj je potreba inverzija napučenosti atoma. Da bi se stimulirana emisija dogodila treba biti više atoma u gornjoj granici lasera koje je visoko energetske stanje nego u donjoj granici lasera s niskim energetske stanjem. (Koechner, 1992)

Formula 5.1 prikazuje da su većina atoma u niskom energetske stanju, dok mali dio atoma koji su u visokom energetske stanju pobuđeni sobnom toplinom ne mogu napraviti stimuliranu emisiju bez laserske pumpe jer atomi u nižem energetske stanju upiju emisiju. (Hecht, 1994)

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\left[\frac{-(E_2-E_1)}{k*T}\right]} \quad (2.4.1)$$

Gdje su:

- N_1 i N_2 su broj atoma
- E_1 i E_2 energetske vrijednosti
- T je temperatura materijala izražena u kelvinima
- k je Boltzmannova konstanta koja iznosi 8.6 eV/kelvin.

Kada atoma ima više u gornjoj granici lasera nego u donjoj granice lasera dolazi do emisije lasera pri prelasku atoma s gornje u gornju granicu lasera. Da bi se inverzija napučenosti atoma dogodila potrebno je imati izvor energije, najčešće laserska pumpa, koja popuni određenu energetske razinu.

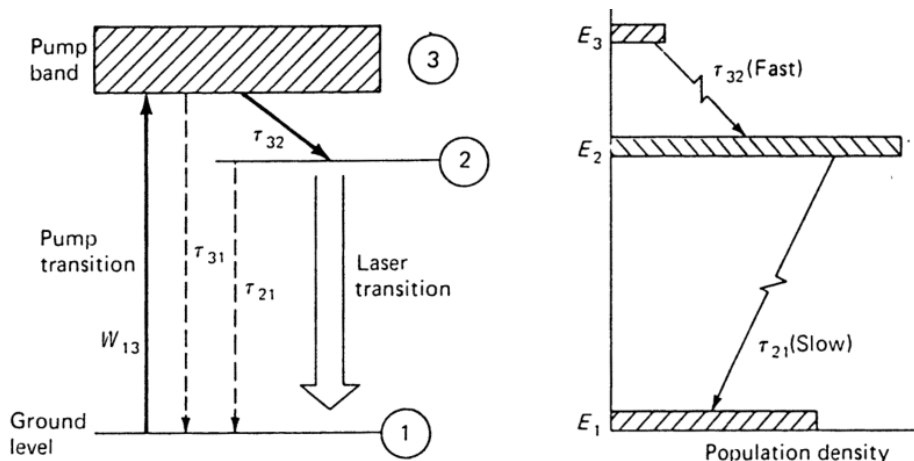
Postoji mnogo načina dobivanja inverzije napučenosti atoma, a dva glavna sustava su sustav s tri energetske i sustav s četiri energetske stanja.

2.4.1. SUSTAV S TRI STANJA[4]

Kako bismo najjednostavnije opisali sustav s tri stanja koje se najčešće koristi kod lasera s čvrstom jezgrom dolazimo do slike 8. U prvobitnom stanju svi ioni materijala lasera su na najnižoj razini (1). Pomoću bljeskalice ioni lasera se dižu na najvišu razinu (3) koja se sastoji od više grupa tako da se podizanje može postići preko širokog raspona spektra bljeskalice. Većina iona na najvišoj razini (3) se brzo prenose u međuprostor (2) kod kojeg se gubitak energije elektrona prenosi na rešetku. I u završnici elektroni se isprazne na prvobitno stanje (1) zbog emisije fotona ako nema novih ili dovoljno jakih podizanja iona pomoću bljeskalice. Upravo se u tom zadnjem dijelu događa radnja lasera. Pad iz svjetlosne razine sastoji se spontanij i stimuliranij zračenij koja proizvodi izlaznu zraku lasera. Potrebno je da promjena iz najvišeg stanja u stanje kod koje laser emitira zraku brža nego kod spontanij promjena kao što je pražnjenje.(Koechner, 1992)

Nedostatak sustava s tri stanja je u tome da laser ima tek 50% iona u međuprostoru koji omogućuje rad lasera dok drugih 50% iona se potroši u spontanij emisiji pri prelasku iz visoke

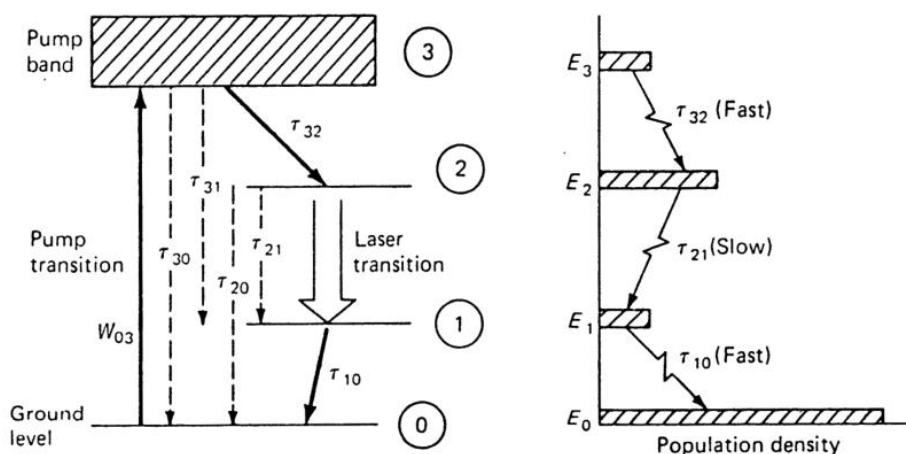
razine u međuprostor. Pri tom prelasku ne dolazi do zračenja i ta se energija veže na rešetku preko elektrona.



Slika 8. Predođba sustava s tri stanja. Izvor: Solid-State Laser Engineering,18

2.4.2. SUSTAV S ČETRI STANJA[4]

Kod rijetkih iona u staklu ili kristalima domaćina materijala koriti se sustav s četiri stanja. Sa slike 9 je vidljivo da je podizanje iz prvobitnog stanja(0) u stanje najviše razine(3) i pražnjenje u međuprostor (2) isti kao kod sustava s tri stanja. Da bi se poboljšala učinkovitost iz međuprostora (2) dolazi do brzih spontanij i stimuliranih zračenja koja proizvode izlaznu zraku lasera i dolaze do razine srednje vrijednosti (1). Iz te srednje vrijednosti razine atomi prelaze sporo u prvobitno stanje(0) prilikom kojem ne dolazi do spontanij i stimuliranih emisija što povećava učinkovitost u odnosu na sustava s tri stanja. Između ta dva stanja mora postojati vrijeme relaksacije koje je vrlo malo i iz tog razloga je potrebno neke materijale hladiti rashladnom tekućinom da bi sustav s četiri stanja mogao funkcionirati. Prednost sustava s četiri stanja je u tome što imaju veću učinkovitost i više nisu potrebne bljeskalice velikih snaga kao kod sustava s tri stanja.



Slika 9. Predođba sustava s četiri stanja. Izvor: Solid-State Laser Engineering,19

2.5. LASERI SA ČVRSTOM JEZGROM

Dvije glavne komponente lasera s tvrdom jezgrom imaju specifično ime. Atomi koji emitiraju svjetlost nazivaju se aktivni ioni, a materijal u kojem su ugrađeni medij. Medij se sastoji od kristala ili stakla i mora udovoljiti strogim optičkim, termalnim i mehaničkim kriterijima. Moraju apsorbirati svjetlost ali ju ne smiju emitirati nego proslijediti rešetci koja mora prihvatiti aktivne ione u strukturi. Termalna svojstva su važna jer svjetlost bljeskalice koja se ne pretvori u zraku lasera završi kao toplina. Prevelika toplina može izazvati termalna ili mehanička oštećenja u mediju lasera. Neravnomjerna raspodjela topline može dovesti do slabljenja kvalitete zrake i smanjenja snage, a u ekstremnim slučajevima može doći do oštećenja ili puknuća laserskog medija. Kristali bolje raspršuju toplinu od stakla zato mogu raditi na višim snagama i bržem režimu rada od stakla istih veličina.[5]

Rijetki zemljani ioni su prirodni kandidati za odabir aktivnih iona zato što imaju oštri fluorescentni prijelaz u gotovo svakoj regiji vidljivog i infracrvenog Spektruma. Najvažniji materijali koji se koriste su: Neodimium, Erbium, Kromium, Titanium i Iterbium. Cobalt, Holmium i slični materijali se ne koriste previše zbog visoke cijene proizvodnje i samim time optimizacijom lasera.

Laseri s tvrdom jezgrom mogu imati razne oblike. Najčešće su u obliku valjka ali mogu biti ploče s ogledalima tako postavljene da svjetlo oscilira kroz ploču. Po izgledu su robusni, lagano je raditi s njima i mogu generirati visoke vršne snage.[2]

2.5.1. RUBINSKI LASER

Rubinski laser koristi sustav s tri stanja. Sastoji se od aluminijevog oksida Al_2O_3 kojemu je u malim postocima oko 0.05% mase umjesto atoma aluminiija Al^{3+} zamijenjen s atomima kroma Cr^{3+} dodavanjem kromovog oksida Cr_2O_3 u rastopljen aluminijev oksid Al_2O_3 najčešće Czochralskovom metodom prilikom čega se dobije $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$. Atomi kromija apsorbiraju zelenu i plavu svjetlost dobivene najčešće iz ksenonske bljeskalice koja ih podiže na viši energetski razinu, a spuštanjem natrag na normalno stanje prilikom čega emitiraju svjetlost karakteristične crvene boje.[4][5]

Aluminijski oksid kao primarni materijal je tvrd i izdržljiv, ima izvrsnu toplinsku provodljivost i kemijski je stabilan. Rade u pulsnom režimu rada i postižu valjnu duljinu od 694.3 nm. (Hecht 1994)

U tablica 2. možemo vidjeti neka svojstva rubinskog lasera.

Tablica 2. Predodba svojstva rubinskog lasera. Izvor: Understanding lasers, 236

Svojstvo	Vrijednost
Primjesa Cr_2O_3 [% mase]	0.05
Koncentracija Cr^{3+} [iona na cm^{-3}]	$1.58 \cdot 10^{19}$
Izlazna valna duljina [nm]	694.3 linija R_1 692.9 linija R_2
Vrijeme višeg stanja lasera [ms]	3ms
Energija fotona [Ws]	$2.86 \cdot 10^{-19}$
Kvantna učinkovitost	0.7

2.5.2. NEODIMSKI LASERI

2.5.2.1. Nd:YAG

Kod neodimskog lasera najčešći ugrađeni medij je itrij-aluminijev granat iliti YAG tvrdi, lomljivi kristal kemijske formule $Y_3Al_5O_{12}$. Dobiva se dodavanjem 0.8-1.5% težine laserskog medija neodimskog oksida Nd_2O_3 prilikom čega atoma neodimija Nd^{+3} zamjene atome itrija Y^{+3} . Najpoznatiji i najkorišteniji je laser s tvrdom jezgrom koji koristi sustav s četiri stanja. (Hecht, 1994)

Nd:YAG emitira infracrvenu svjetlost na valnoj duljini od 1064 nm, ali može emitirati i na 1318 nm s 20% snage ili na 946 nm sa većim snagama. Zbog dobrih termalnih i optičkih karakteristika Nd:YAG laser može raditi u pulsnom i stalnom režimu rada. Pri stalnom režimu rada laser može generirati drugi, treći, četvrti i peti harmonik koje mijenjaju valnu dužinu laser koje možemo vidjeti u tablici 3. Najvažnije valne duljine se nalaze u drugom harmoniku gdje laser ima vidljivu zelenu zraku na valnoj duljini od 532 nm, dok kod valne duljine od 573 nm ima plavu zraku.[6]

Tablica 3. Predođba Nd:YAG harmonikaa. Izvor: Understanding lasers,239

Harmonik	Valna duljina [nm]	
Osnovni	1064	946
Drugi	532	473
Treci	335	
Četvrti	266	
peti	213	

2.5.2.2. Nd:STAKLO

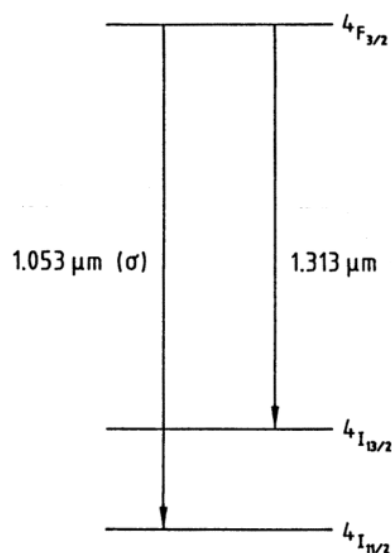
Staklo se isto može koristiti kao ugrađeni medij neodimskog lasera. Postoje mnogo vrsta stakla koji se koriste a neki od najznačajnijih su silikatno, fosforno i kvarcno staklo. Izrada stakla je mnogo razvijenija od izrade kristala stoga se takvi laserski mediji mogu proizvoditi u raznim oblicima od par mikrometra do čak 2 metra. (Koechner, 1992)

Takvi laseri imaju širu propusnost što dovodi do užeg optičkog impulsa. Imaju slabe termičke karakteristike i samim time trebaju više vremena za hlađenje što im onemogućuje stalni rad. Valna duljina ovisi o vrsti stakla, pa uz pomoć silikatnog stakla dobiva se valna duljina od 1062 nm, kod fosfatnog stakla 1054 nm a kod kvarcnog stakla 1080 nm.[4]

2.5.2.3. Nd:YLF I Nd:YVO₄

Neodimski laseri s ugrađenim medijom litij-itrijevog Florida imaju dvostruko duži vijek trajanja od YAG lasera stoga su prigodni za diodne lasere. Imaju visoku termalnu provodljivost

zbog koje se ne treba dodatno hladiti laserski medij kao kod YAG lasera. Mehanička svojstva su slabija nego kod YAG lasera što čini laserski medij krhkim i težim za rukovanje zbog mogućnosti od puknuća. U ovisnosti od polarizacije Nd:LYF laseri mogu proizvesti valne duljine od 1053 nm i 1313 nm prikazano na slici 10. Pogodni su za metodu Q-prekidanja jer su u mogućnosti pohraniti više energije u sebi.[4]



Slika 10. Predođba valnih duljina Nd:LYF. Izvor: lasera Solid state engenering, 61

Itrijev vandat se isto može primijeniti kod neodimiskih lasera. Ima jaku stimuliranu emisiju u poprečnom presjeku na valnoj duljini od 1064 nm i jaku apsorpciju pri 809 nm. Najjača apsorpcija se događa kada je laserska pumpa paralizirana isto kao i lasersko zračenje. Nedostatak ovog lasera je kratko stanje pobude.[4]

U tablici 4 možemo vidjeti neka svojstva Nd:YLF i Nd:YVO₄ lasera.

Tablica 4. Predođba svojstva Nd:YLF i Nd:YVO₄ lasera Izvor: Solid-State Laser Engineering, 77

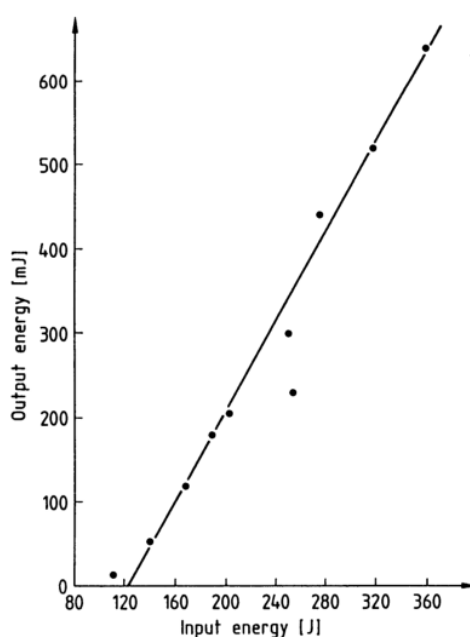
	Nd:YLF	Nd:YVO ₄
Valna duljina [nm]	1053,1313	1064
Vrijeme višeg stanja lasera[ms]	480	100
Koncentracija primjese[iona na cm ⁻³]	$1.8 \cdot 10^{-19}$	$5,5 \cdot 10^{-20}$
Gustoća[g/cm ³]	3.99	4.22

2.5.3. ERBIUMSKI LASER

2.5.3.1. Er:YAG

Kod erbijskog lasera najčešći ugrađeni medij je itrij-aluminijev granat iliti YAG tvrdi, lomljivi kristal kemijske formule $Y_3Al_5O_{12}$. Dobiva se dodavanjem 50% težine laserskog medija erbijumovog oksida Er_2O_3 prilikom čega atoma erbijuma Er^{+3} zamjene atome itrija Y^{+3} . (Hecht, 1994)

Efikasnost optičke pumpe je jako mala jer je potrebno za podizanje svjetlost valne duljine od 600 nm da bi se postigla gornja granice lasera s kojom se dobije laserska zraka od 2940 nm (slika 11). Nije moguće napraviti Q-prekidanje jer je vijek trajanja donje granice lasera poprilično dugo oko 2 ms dok gornja granica lasera iznosi tek 0.1 ms.[4]



Slika 11. Predođba grafikona ulaznih i izlaznih energija Er:YAG lasera. Izvor: *Solid-State Laser Engineering*,63

Usprkos svim tim negativnim karakteristikama erbijski laseri se koriste u medicini jer njegova laserska zraka nije štetna za ljudske oči i ima visoku apsorpciju u tkivu koja je veća od 3000 cm^{-1} . [3]

U tablici 5 možemo vidjeti neka svojstva Er:YAG lasera

Tablica 5. Predođba svojstva Er:YAG lasera. Izvor: <http://www.sintecoptronics.com/CrystalErYAG.asp>

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća [g/cm^3]	5.35
Valna duljina [nm]	2940
Vrijeme višeg stanja [ms]	90
Valna duljina optičke pumpe [nm]	600-800
Energija fotona [J]	$6.75 \cdot 10^{-20}$

2.5.3.2. Er:STAKLO

Silikatna i fosforna stakla se koriste kod erbijskog lasera koje stvaraju lasersku zraku valne duljine 1540 nm. Zbog slabe apsorpcije optičke pumpe i korištenja sustava s tri stanje erbiumu se dodaje iterbium koji laserski medij čini boljim jer apsorbira svjetlost u regijama gdje erbium ne može.

Yb:Er:staklo imaju vrlo malu apsorpciju na valnim duljinama od 400-900 nm pa se mora podizanje napućenosti atoma raditi na valnim duljinama od 900 do 1000 nm zbog dodanih Yb⁺³ iona.

2.5.4. PODESIVI LASERI

Kod većine lasera s tvrdom jezgrom izlazna energija se dobiva putem stimuliranja emisija u laserskom mediju putem fotona. Kod podesivih lasera s tvrdom jezgrom izlazna snaga ostaje ista, a do promjenjivih valnih duljina dolazi zbog suradnje između Coulombovog polja postojanih iona, kristalnog polja rešetke ugrađenog medija i sredstva za povezivanje elektrona i fotona koja dopušta apsorpciju i emisiju širokog pojasa. (Koechner, 1992)

Tablice 6 prikaziva neke od podesivih lasera i njihovih valnih duljina. Uz odgovarajuću podesivu optiku podesivi laseri su u mogućnosti promijeniti valnu duljinu do 20% od njene nominalne valne duljine.

Tablica 6. Predodba podesivih lasera sa odgovarajućom valnom duljinom. Izvor: Understanding laser,243

Tip	Valna duljina[nm]
Ti:Safir	660-1100
Aleksandrit	680-830
Cr:LiSaF	760-940
Co:MgF ₂	1600-2400
Tulium:YAG	1870-2160

2.5.4.1. Ti:SAFIR

Titaniumov safir se dobiva slično kao rubinski laser tako da se titanium oksid Ti_2O_3 dodaje s aluminijevim oksidom Al_2O_3 u mjerilu od 0.1-0.5% težine laserskog medija kod kojeg Ti^{3+} okupira neke atome Al^{3+} u kristalnoj rešetci. Ti-safir laseri imaju veliki raspon propusnosti emisije i dobre karakteristike materijala. Koriste se u istraživanju jer mogu generirati kratke impulse u trajanju od 10^{-12} s i imati podesive valne duljine. (Hecht, 1994)

Najveću valnu duljinu imaju na 700-900 nm, a mogu emitirati od 660 nm gdje imaju crvenu boju sve do 1100 nm gdje su infracrveni. Nijedni podesivi laseri nemaju tako velik raspon valnih duljina bez mijenjanja optika. (Weitz i sur., 1992)

Mogu generirati harmonike, gdje drugi harmonik ima valnu duljinu od 350-470 nm, treći na 235-300 nm i četvrti blizu 210 nm. Nedostatak lasera je ta što je valna duljina apsorpcije svjetlosti na 500 nm, a duljina apsorpcije u gornjoj granici lasera iznosi 3.2 μ s, što je prekratko za korištenje optičkih pumpa. Zbog toga se kao laserske pumpe koriste laseri kao što su Nd:YAG u drugom harmoniku ili argonski laser koji imaju približnu valnu duljinu od 500 nm.[8][1]

2.5.4.2. ALEKSANDRIT

Aleksandrit je berilijumatov aluminat kristal $BeAl_2O_4$ u kojeg je dodan kromom kod kojeg su Cr^{3+} atomi zamijenjeni s nekim Al^{3+} atomima u mjerilu od 0.04-0.12% težine laserskog medija. Ima dobre fizičke i kemijske karakteristike, tvrdi i čvrsti, kemijski su postojani i imaju dobru termalnu provodljivost što im omogućuje podizanje s velikim energijama bez termalnih oštećenja kao i kod rubinskog lasera. Za podizanje napućenosti atoma koriste se bljeskavice ili crvene diode jer najbolje apsorbiraju u crvenom cijelu spektra. (Hecht, 1994)

Zbog neobične kinetike ima dvije elektroničke razine koje se ponašaju kao jedna gornja granica lasera. Jedna je u donjem dijelu podesivog spektra, a druga je na stalnom dijelu dužeg vijeka i s vrlo manjom energijom.[5]

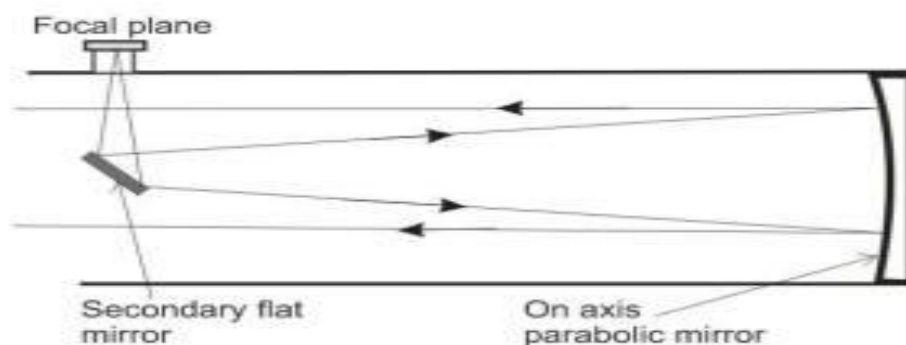
Aleksandritu se snaga povećanja kod povećanja temperature s kojom se povećava i valna dužina do 959 nm. Može emitirati na valnoj duljini od 680 nm dok emitira najjače na 700- 830 nm. Može generirati harmonike gdje je drugi harmonik ima valnu duljinu od 360-400 nm, treći 240-270 nm i četvrti 190-200 nm. U tablici 7 prikazana su neka svojstva aleksandrit lasera.

Tablica 7. Predodžba svojstva Aleksandrit lasera. Izvor: Principle of lasers,393

Svojstvo	Vrijednost
Primjesa [% mase]	0.05-0.3
Koncentracija primjese [iona na cm^{-3}]	$1.8-5.4 \cdot 10^{19}$
Valna duljina [nm]	680-830
Vršna valna duljina [nm]	760
Vrijeme višeg stanja lasera [ms]	1
Tvrdoća [kg/mm]	2000
Termalna provodljivost [W/cm *kelvin]	0.23

2.6. KOLIMATOR

Kolimator je po izvedbi invertiran teleskop. Postoje mnogo vrsta, a svi se sastoje se od cijevi u kojoj je zaobljeno zrcalo ili leća na jednom kraju, a ravno zrcalo da drugom, izvorom svjetla i okularom prikazano na slici 12. Koriste se za testiranje, kalibriranje i mjerenje optičkih sistema.



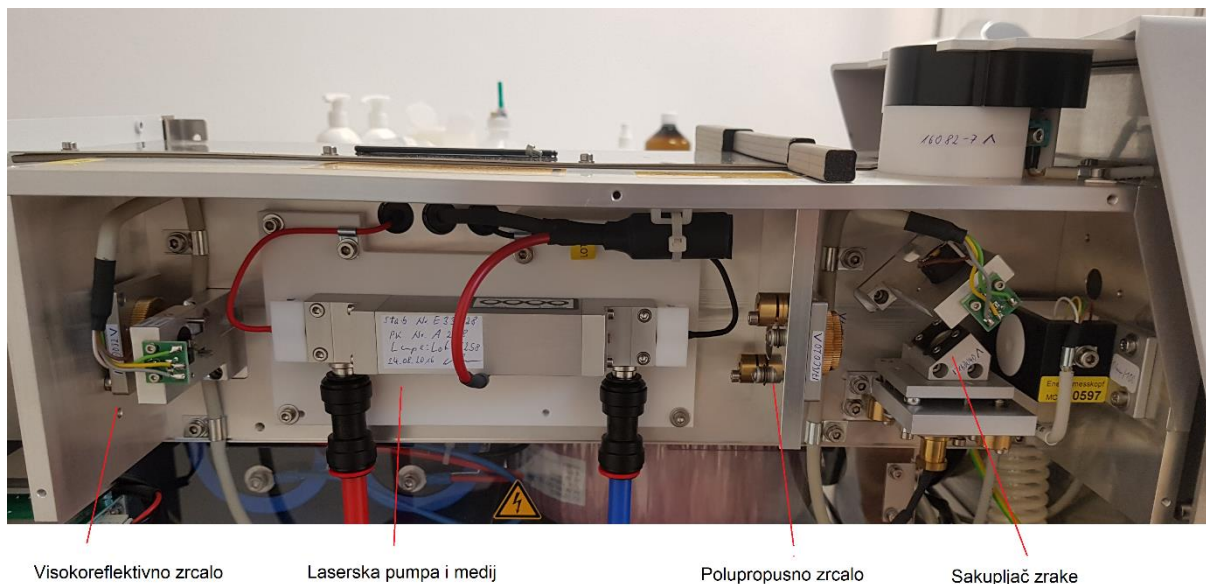
Slika 12. Predođba građe kolimatora. Izvor: http://www.inframet.com/ir_collimators.htm

Kolimator fokusira točku u beskonačnost što na okularu izgleda kao točkica. Projiciranjem pomoću izvora svjetlosti u optički rezonator lasera zraka se reflektira natrag u točku iz koje je projicirana prilikom čega se u okularu vidi nultočka. Ako zrcala ili laserski medij nisu paralelni s kolimatorom na okularu se mogu vidjeti točke refleksije pomaknute za određen kut što prikazuje njihovu točku refleksije.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

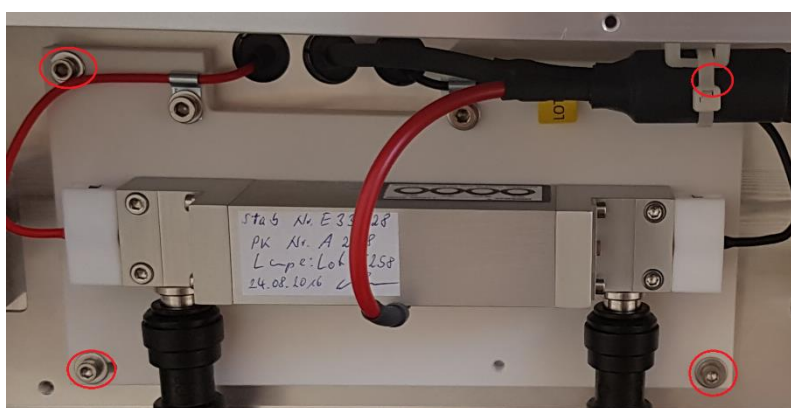
3.1. NIVELIRANJE LASERA BEZ KOLIMATORA

U teoretskom dijelu smo već objasnili pojednostavljenu građu lasera. Na laseru predloženom u prilogu 1 na kojem je rađeno niveliranje po građi je složeniji vidljivo na slici 13., ali su za održavanje lasera potrebni samo dijelovi objašnjeni u poglavlju 4.



Slika 13. Predložba optičkog rezonatora MCL31 lasera

Prilikom izrade lasera kućište u kojem se nalazi laserska pumpa i medij mora se fiksirati na postolje sa četiri vijaka predloženo na slici 14., a prilikom servisa potrebno je pregledati i očistiti krajeve laserskog medija medicinskom gazom natopljenom etanolom.



Slika 14. Predložba postolja i kućišta laserske pumpe i medija

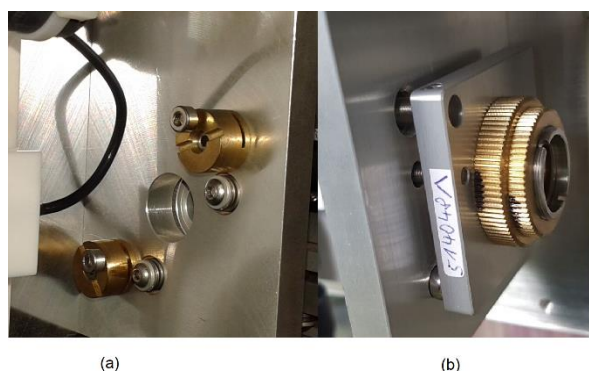
Krajevi laserskog medija su polirani i ako su vidljiva puknuća ili oštećenja laserskog medija, predočenom na slici 15., se obvezno mora promijeniti jer i najmanja oštećenja smanje snagu, efikasnost i stabilnost laserske zrake.



Slika 15. Predođba oštećenog laserskog medija

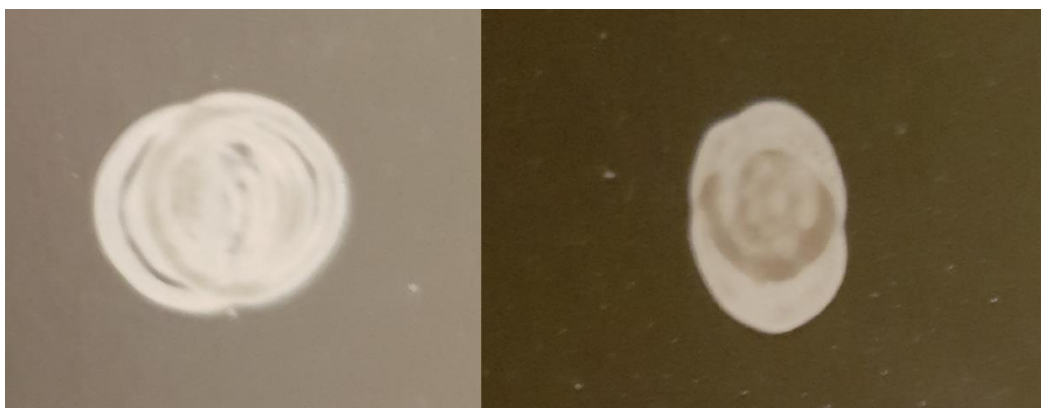
Kod niveliranja lasera bez kolimatora je teže napraviti nivelaciju lasera. Pregledavaju se i očiste se zrcala koje čine optički rezonator.

Zrcala se ne smiju skinuti u isto vrijeme jer bi to uveliko otežalo nivelaciju. Djelomično reflektirajuće zrcalo se odšarafi s postolja (slika 16a), pregleda se dali imaju oštećenja ili nečistoća i očiste se pomoću medicinske gaze natopljenom etanolom ili zamjeni s novim ako su vidljive oštećenja nastalim paljenjem prašine na zrcalu koje je nemoguće očistiti.



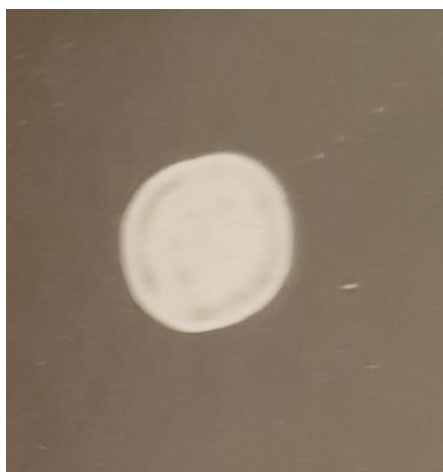
Slika 16. Predođba a) mehanizma za nivelaciju, b) postolje zrcala

Nakon vraćanja zrcala na postolje testira se laserska zraka tako da se na udaljenosti od 2.1 m što je u principu duljina zglobove ruke na papir ispali jedan impuls lasera. Ako na papiru su vidljiva dva kruga što predočuje slika 17(a i b) laser je potrebno niveliran.



Slika 17. Predođba ne niveliranog lasera

Da bi se laser nivelirao potrebno je postaviti djelomično reflektirajuće zrcalo paralelno s laserskim medijem. To se postiže zatezanjem ili otezanjem dvaju vijaka na postolju zrcala (slika 16a). Ovaj postupak se ponavlja sve dok na papiru nije vidljiva jedna kružnica predocenom u slici 18.

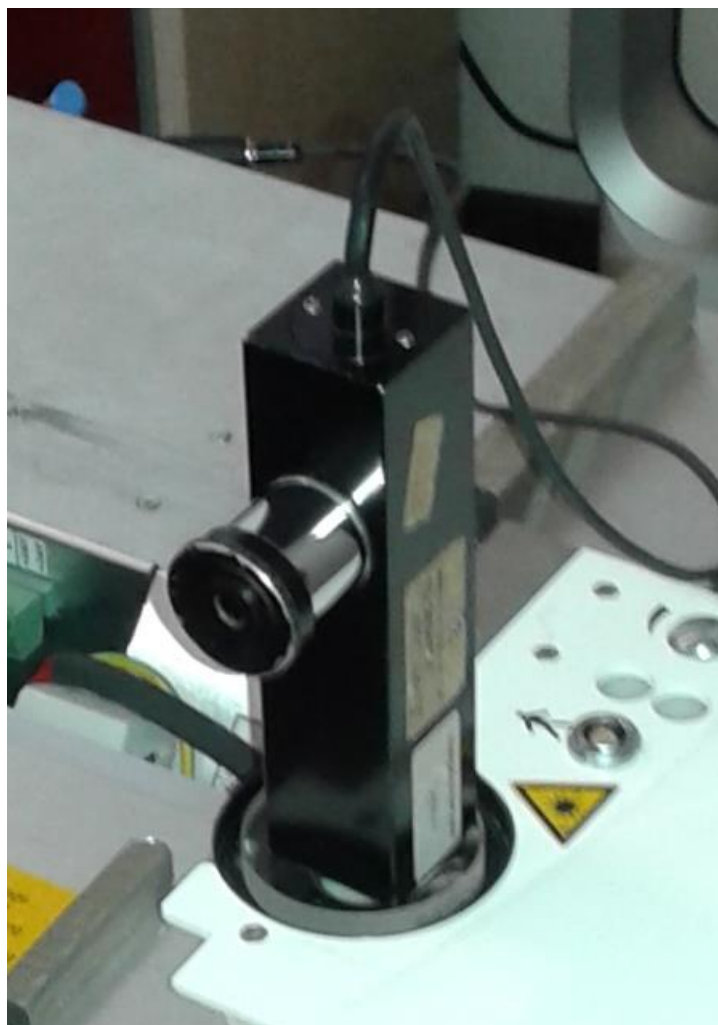


Slika 18. Predođba nivelirane laserke zrake

Nakon što je zrcalo visokog stupnja refleksije montirano u postolje isti postupak se mora napraviti s tim zrcalom. Nakon toga potrebno je izmjeriti snagu s mjernim instrumentom i podesiti snagu na maksimum tako da se prilikom rada lasera mjeri i oteziva ili zateziva vijak za jedan krug. Kada se pronalazak mjesta gdje laser daje najveću snagu potrebno je vijke vratiti na to mjesto i ponovno izmjeriti snagu da bi sa sigurnošću znali da je optički rezonator niveliran na najbolji mogući način u kojem daje maksimalnu energiju.

3.2. NIVELIRANJE LASERA S KOLIMATOROM

Niveliranje s kolimatorom predloženom u prilogu 2 je lakše, brže i točnije nego niveliranje bez kolimatora. Kolimator se postavi na paralelno staklo koje je stavljeno na izlaz lasera kao na slici 19.



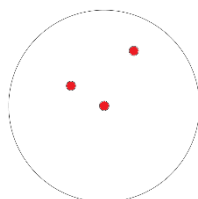
Slika 19. Predođba kolimatora i paralelnog stakla

Pomoću njega se vidi točka fokusa koja predstavljaju zrcala i laserski medij nakon što se otvori i pričvrsti zatvarač zbog lakše nivelacije vidljivo na slici 20.



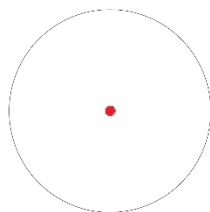
Slika 20. Predođba zaglavljenog zatvarača

Prvo se pregledava laserski medij i očistiti krajeve laserskog medija medicinskom gazom natopljenom etanolom. Nakon toga vade se zrcala i čiste se s medicinskom gazom natopljenom etanolom i slobodno se montiraju natrag oba zrcala. Na kolimatoru će biti vidljivo više točaka što predočuje slika 21. koje je potrebno identificirati tako da se karticom ili nekim drugim predmetom ulazi i izlazi iz putanje laserske zrake prilikom čega će na kolimatoru nestati neke točke.



Slika 21. Predođba točka fokusa optičkog rezonatora na okularu kolimatora

Potrebno je prvo prepoznati točku koja predstavlja fokus laserskog medija i djelomično reflektirajućeg zrcala. Prilikom zatezanja ili otezanja vijaka točka fokusa koja predstavlja fokus djelomično reflektirajućeg zrcala se miče i potrebno ju je namjestiti na točku fokusa laserskog medija. Nakon toga se isti postupak napravi sa zrcalom visokog stupnja refleksije. Pri završetku nivelacije sve točke fokusa moraju biti u jednoj točki fokusa što predočuje slika 22.

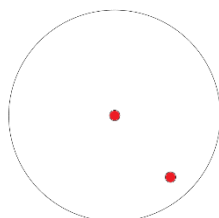


Slika 22. Predodba niveliranog optičkog rezonatora na okularu kolimatora

Nakon završetka nivelacije potrebno je izmjeriti snagu s mjernim instrumentom i podesiti snagu na maksimum tako da se prilikom rada lasera mjeri i otezava ili zateziva vijak za jedan krug. Kada se pronalazak mjesta gdje laser daje najveću snagu potrebno je vijke vratiti na to mjesto i ponovno izmjeriti snagu da bi sa sigurnošću znali da je optički rezonator niveliran na najbolji mogući način u kojem daje maksimalnu energiju.

3.3. NIVELIRANJE SAKUPLJAČA ZRAKE

Sakupljač zraka je zrcalo postavljeno pod 45° koje sakuplja lasersku zraku i pokaznu zraku. Potrebno je izvaditi zrcalo, pregledati ga i očistiti medicinskom gazom natopljenom etanolom. Najlakše ga je nivelirati pomoću kolimatora, tako da se provjeri točka fokusa laserske zrake i točka fokusa pokazivača. Fokus pointera se nije mogla promijeniti jer ga se prilikom održavanja nije diralo. Točku fokusa laserske zrake potrebno je pomaknuti u točku fokusa pokazivača pomoću dva vijaka tako da se otežu ili zatežu dok se točke fokusa ne stope u jednu točku.



Slika 23. Predodba ne niveliranog sakupljača zraka na okularu kolimatora

Dodatno se može provjeriti tako da se na ciljnik postavi na izlaz lasera predloženo na slici 24. i ispaliti impuls, ako je na papiru krug u sredini ciljnika prva točka lasera je u nivelirana (slika 26.).



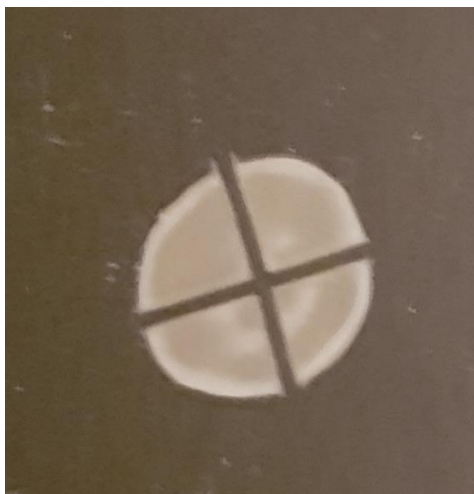
Slika 24. Predožba postolja za testiranje sakupljača zraka sa ciljnikom na izlazu iz lasera

Nakon toga se montira zglobna ruka lasera i na nju se pričvrsti ciljnik što predočuje slika 25.



Slika 25. Predožba ciljnika montiranog na zglobnu ruku za testiranje sakupljača zrake

Ako je nakon pucnja na papiru nastao krug koji u sredini ima ciljnik predloženo na slici 26. sa sigurnošću možemo znati da je sakupljač zrake niveliran, a ako ciljnik nije u sredini kružnice nivelacija se mora ponoviti.



Slika 26. Predodba ispravnog niveliranja sakupljača zrake

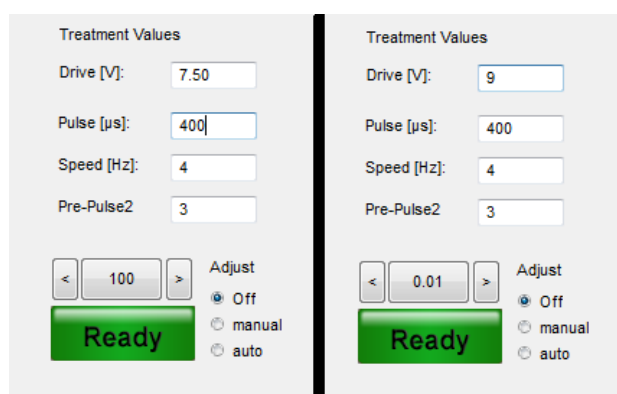
3.4. MJERENJE SNAGE

Mjerenje snage vrši se mjernim uređajem predloženim u prilogu 3 tako da se mjerna glava i kraj zglobne ruke pričvrste na postolje predloženo na slici 27., a razmak između mjerne glave i kraja ruke mora iznositi 10 cm.



Slika 27. Predođba umjeravanja i mjerenja snaga

U servisnom programu se postavljaju napon, valna duljina bljeskalice i broj pre-pulsa kao na slici 28. pritisne se „ready“ i ispali se zraka uz pomoć nožne sklopke s ovim postavkama.



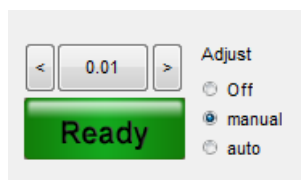
Slika 28. Predođba postavka lasera za provjeru snaga

U dokumentaciji lasera potrebno je vidjeti tvorničke iznose vrijednosti mjerenja i usporediti ih s trenutnim. Ako je odstupanje u vrijednostima manja od 20% laser je ispravan i može se

napraviti umjeravanje ako je potrebna, a ako je odstupanje veće od 20% potrebno je pregledati laserski medij, pumpu i/ili zrcala i otkloniti kvar.

3.5. UMJERAVANJE

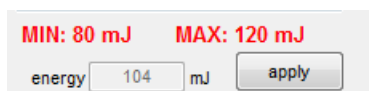
Da bi se umjeravanje moglo napraviti potrebno je u servisnom programu pritisnuti na „manual“ i nakon toga „ready“ predočeno na slici 29.



Slika 29. Predodba postavke za umjeravanje

Prilikom čega se izlista tablica svih potrebnih parametra lasera predočeno u tablici 8. Tablica se sastoji od osnovnih parametra kao što su frekvencija valna duljina, napon i energija. Prilikom umjeravanja mijenja se zadani napon, što je moguće u veličinama od 0.01, 0.1 i 1 V koje se mijenjaju klikom na prozor predočeno na slici 29. koji je na slici 0.01. Klikom na znak veći ili manji mijenja se napon za vrijednost koja je prethodno zadana.

Umjeravanje se vrši tako da se ispuca 20 impulsa u mjernu glavu iz koje se očitava srednja vrijednost zrake. Iznad tablice u desnom kutu se nalazi se dopuštena vrijednost minimalne i maksimalne energije koju je najbolje postaviti u aritmetičku sredinju, a ispod toga je prozorčić u kojoj se upisuje vrijednost predočeno na slici 30. koja se očitana na mjernom uređaju.



Slika 30. Predodba minimalne i maksimalne snage

Ako je vrijednost ispod ili iznad dopuštenih vrijednosti potrebno je promijeniti napon tako da nakon mjerenja mjerni uređaj pokazuje što bližu energiju zadane aritmetičke sredine koju upišemo i pritisnemo „apply“. Ovaj postupak ponavljamo za sve parametre.

Tablica 8. Predođba parametra za umjeravanje i njihova energija

Frekvencija [Hz]	Dulina pulsa[nm]	Temperatura[⁰ C]	Napon[V]	Energija[mJ]
4	200	22.1	6.89	104
4	400	25.5	5.66	110
4	700	25.4	5.06	100
4	1000	25.3	4.90	113
8	200	25.4	6.67	103
8	400	25.5	5.49	100
8	1000	25.9	4.87	101
12	200	25.3	6.61	102
12	400	25.7	5.46	104
12	700	25.5	4.97	97
12	1000	26.1	4.88	98
15	700	25.8	4.97	97
15	1000	26.4	4.90	100
20	200	26.7	6.55	102
20	400	26.5	5.42	94
20	700	26.4	5.01	104
8	200	26.5	7.99	575
12	200	26.6	7.89	590
12	1000	27.1	5.63	704
15	700	27.7	5.99	808
4	400	27.5	7.24	1013
4	700	27.2	6.32	1014
4	1000	26.9	5.98	986
12	700	27.6	6.23	996
12	1000	27.0	5.95	998
8	1000	26.5	6.40	1616
8	400	26.7	7.77	1660
12	400	27.3	7.77	1648
12	700	27.8	6.88	1664
8	700	27.6	7.33	2325
4	700	28.1	7.66	2534
4	1000	28.2	7.05	2501

4. ZAKLJUČAK

Od otkrića laseri su toliko napredovali da je život bez njih ne zamisliv. Zbog novih metoda i materijala laseri su postali jeftiniji za izradu i samim time pristupačniji za uporabu. Najznačajnija im je primjena u medicinske svrhe u aparatima pomoću kojih se na neinvazivan način mogu napraviti zahvati za koje do prije desetak godina nije bilo rješenja. U teoretskom dijelu rada opisana je funkcija lasera s tvrdom jezgrom. Poznavanjem građe i vrste lasera te načina rada moguće je provoditi godišnje održavanje koje je opisano u eksperimentalnom dijelu. Eksperimentalni dio rada temelji se na održavanju MCL31 lasera koji se koristi u dermatološke svrhe. Zbog korištenja aparata u medicinske svrhe potrebno je detaljno i oprezno napraviti godišnje održavanje. Aktivnosti se svode na čišćenje glavne komponente lasera koje su optički rezonator i laserski medij. Iz opisa u radu je vidljivo da je nivelacija brža i točnija s kolimatorom i samim time dobiiva se bolji i pouzdaniji rad uređaja. Prilikom mjerenja snage lasera utvrđuje se da li je aparat ispravan i da li je došlo do oštećenja u laserskom mediju ili pumpi.

5. LITERATURA

- [1] Massimo Inguscio, Richard Wallenstein (1992.): Solid State Lasers New Developments and Applications
- [2] C. Breck Hitz, J. Ewing, Jeff Hecht (2012.): Introduction to Laser Technology, Fourth Edition, 55-63
- [3] A. Sennaroglu (2007.): Solid-State Lasers and Applications
- [4] Walter Koechner (1992.): Solid-State Laser Engineering, Third Completely Revised and Updated Edition
- [5] Orazio Svelto (1998.): Principles of Lasers Fifth Edition
- [6] Jeff Hecht (2008.): Understanding Lasers, Third Edition
- [7] Frank Träger (2007.): Springer Handbook of Lasers and Optics
- [8] Jianquan Yao, Yuye Wang (2012.): Nonlinear Optics and Solid-State Lasers
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/Autocollimation>
- [10] <http://www.rondexter.com/professional/equipment/collimators.htm>

PRILOG 1

1 Technical data

Designation	Part Number	Description
MCL 31 Dermablade	1820	Er:YAG Laser (main unit)
VarioTEAM Handpiece	4075	Standard handpiece for skin ablation (1-6mm)
VarioTEAM XL Handpiece	4076	Standard handpiece for skin ablation (8-12 mm)
MicroSpot Handpiece	4077	Handpiece for fractional skin resurfacing

Specification	MCL 31 Dermablade
Device model	Floor-based unit
Display	Display with capacitive push-buttons below glass plate
Operator guidance	Touchscreen
Cooling	Internal cooling cycle
Coolant	Distilled water only
Door interlock connector	5V/10mA
Laser warning lamp	Potential-free relay contact max. 24V/1A (make contact)
Permissible ambient conditions	Temperature: 15°C to 30°C Rel. air humidity: max. 85% (no condensation) Height: max. 2000m above sea level
Permissible transport and storage conditions	Temperature: 10°C to +70°C Rel. air humidity: max. 90% (no condensation)
Dimensions	360 × 600 × 930 mm (W × D × H) without mirror arm and handpiece
Weight	approx. 75 kg
Power requirements	230V/50Hz max. 2500W 120V/60Hz max. 2500W
Main fuse	overcurrent release 16A, medium slow-blow
Overvoltage category	II (IEC 60664-1)
Peak mains voltage	V MT peak = 2500V peak
Max. nominal mains voltage	V MN rms = 300V rms
Classification according to directive 93/42/EEC	II b
Accessories	See chapter 7 Accessories
Operating mode	The device has been designed for continuous operation
Smoke evacuation	Inbuilt smoke evacuation with three-stage filter system
Specification	Laser
Laser model	Er:YAG laser (solid state laser)
Wavelength	2940 nm
Laser class	4
Required laser safety goggles (As specified in DIN EN 207: 2009)	2940 nm I LB4
Pulse duration	100/300/600/1000 μs (Ablation mode) 600 μs (Thermal mode)
Pulse energy	max. 2.5J
Pulse frequency	1/4/8/10/12/15/20 Hz (Ablation mode) 20 Hz (Thermal mode)
Spot sizes (handpieces)	VarioTEAM handpiece: 1/2/3/4/5/6 mm VarioTEAM XL handpiece: 8/10/12 mm MicroSpot Zoom handpiece: 13 × 13 mm 169 spots, diameter 350 - 600 μm 10 – 25% coverage
Output power tolerance	± 10%
Laser beam mode	Multimode
Laser beam diameter at the handpiece output	See spot sizes
Energy density	Ablation mode: 2 – 250 J/cm ² Thermal mode: 1.5 J/cm ² MicroSpot mode: 2 – 75 J/cm ² (max. sequence of 15 pulses)
Beam divergence at the handpiece output (round angle, 1/e ²)	Max. 80 mrad (4.5°)
Nominal ocular hazard distance (with handpiece)	2 m
Beam delivery:	Articulated mirror arm with VarioTEAM handpiece Optionally: MicroSpot handpiece
Pilot laser:	Laser diode, 635 nm, < 2 mW, selectable intensity class 2 laser
Fume extraction:	Built-in functionality

PRILOG 2



TRIOPTICS

TRIOPTICS GMBH · OPTICAL TEST EQUIPMENT

TELESCOPES / AUTOCOLLIMATORS

Delivery Kit

The Telescopes designated by the code mentioned in the table are delivered as complete -ready to work-instruments:

- tube mounted objective lens
- reticle adapter incl. reticle
- standard eyepiece, magnification 16x

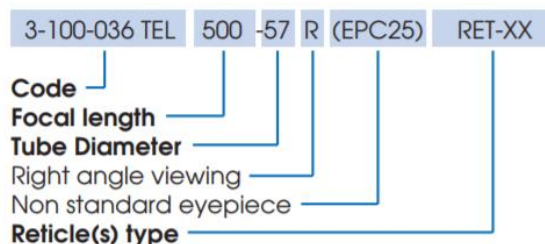
Optional Items

- Eyepieces with magnification 10x, 12x and 25x
- Holders
- Eyepiece micrometers

- Additional achromats in mount fitting on the objective lens tube
- CCD-camera attachment

Ordering Information

To order a telescope please specify:



TYPE	Focal length	Tube diameter	Free Aperture	Field of View/ Measuring range	Resolution for reticle line 10 μ
	(mm)	(mm)	(mm)	(degree)	(arcsec)
ACM 100-38	100	38.1	30	6°/3°	10

PRILOG 3



FieldMaxII Family

Laser Power and Energy Meters



Features

- FieldMaxII-TOP, -TO and -P models
- Large, bright, backlit LCD display
- Digital accuracy with analog-like movement for laser tuning
- Works with thermopile, optical, and pyroelectric sensors
- Measures energy up to 300 pps
- Intuitive button-driven user interface
- USB interface with complete host control capability
- Analog output with selectable full-scale voltage (1, 2, and 5V)
- LabVIEW drivers, applications software, ActiveX DLL server components
- Portable AC/DC operation
- Rechargeable battery pack
- Compact, rugged enclosure with stand

Device Specifications	FieldMaxII-TOP	FieldMaxII-TO	FieldMaxII-P
Function	Power and energy	Power	Energy
Measurement Resolution (%)	0.1 of full-scale		
Measurement Range	Sensor dependent - reference sensor specifications		
Accuracy	±1.0 ±2LSD		
Digital Meter (%)	Meter accuracy + sensor accuracy		
System	±1.0		
Analog Output (%)	±1.0		
Uncertainty (%)	±1.0		
Power Sampling Rate (Hz)	10	10	—
Maximum Pulse Rep. Rate (Hz)	300	—	300
Display (mm)	58 x 73, fixed-segment LCD with backlight		
Digital Tuning Indicator (msec)	100 time constant		
Statistics	Mean, max., min., standard deviation		
PC Interface	USB 1.1		
Analog Output (VDC)	0 to 1, 2, or 5 (selectable)		
Internal Trigger	2 to 20% of full-scale, selectable	—	2% to 20% of full-scale, selectable
Temperature			
Operating Range	5 to 40°C		
Storage Range	-20 to 70°C		
Instrument Power (VAC)	100 to 240, 50/60 Hz		
Instrument Batteries	Rechargeable NiMH battery pack		
Regulations Met	CE, RoHS, WEEE		
Dimensions (H x W x D)	200 x 100 x 40 mm, 0.5 kg (7.87 x 3.94 x 1.57 in.)		
Weight	0.5 kg (1.1 lbs.)		
Controls & Connections	Front Panel		
PWR	Toggle power switch and backlight		
HZ	Display repetition rate	—	Display repetition rate
J/W	Select joules or watts mode	—	—
ZERO	Reset ambient offset for thermal and optical sensors	—	Zero stats
AUTO	Engage auto-ranging with power sensors	—	—
STAT	Display statistics: mean, max., min., standard deviation		
AVG	Engage display averaging		
λ	Enter wavelength and engage wavelength compensation		
ATTEN	Enter attenuation factor and engage attenuation		
AREA	J/cm ² (fluence)	W/cm ² (power density)	J/cm ² (fluence)
HOLD	—	Holds displayed values on screen	—
TRIG	Select trigger level with energy sensors	—	Select trigger level with energy sensors
SETUP/LOCAL	Set and enter button/Takes local control of meter back from PC		
ARROW KEYS	Manually control range; Select Stats parameter; Select and change numerical values		



Features

- Superior damage resistance
- High repetition rate operation
- Large dynamic range gives each sensor broad coverage
- Low noise and excellent linearity for greater accuracy
- Large active area

Coherent EnergyMax sensors enable laser pulse energy measurement over a broad range of wavelengths, repetition rates, pulse energies and beam diameters. With their unique combination of superior performance and user-friendly convenience, EnergyMax sensors are your best choice no matter what your particular laser energy measurement need. EnergyMax sensors are highly linear in terms of repetition rate, laser pulse width, and measured energy. They are also accurate across a broad range of wavelengths due to onboard wavelength compensation. In addition, automatic temperature compensation accounts for

changes in ambient temperature, as well as for heat generated by absorption of the laser energy. Temperature compensation also enables the use of user-installable heat sinks for even higher average power handling capabilities. Coherent EnergyMax sensors are the most linear and accurate on the market.

Description	Wavelength Range (μm)	Min. Energy	Max. Energy	Max. Average Power (W)				Max. Rep. Rate (pps)	Max. Pulse Width (μs)	Active Area Dia. (mm)	Detector Coating	Diffuser	Calibration
				No H.S. ¹	Small H.S.	Med. H.S.	Large H.S.						
J-50MB-YAG	0.266 to 2.1	2.4 mJ	3J	20	–	–	48	50	340	50	MaxBlack	YAG	1064