

»Mladi raziskovalci Slovenije«

55. srečanje

DUŠIKOV LASER

Raziskovalno področje: ASTRONOMIJA ALI FIZIKA

Raziskovalna naloga

Raziskovalec: Žiga Kramberger

Mentor: Aljoša Kancler

Prva Gimnazija Maribor

Maribor, maj 2021

»Mladi raziskovalci Slovenije«

55. srečanje

DUŠIKOV LASER

Raziskovalno področje: ASTRONOMIJA ALI FIZIKA

Raziskovalna naloga

Raziskovalec: Žiga Kramberger

Mentor: Aljoša Kancler

Prva Gimnazija Maribor

Maribor, maj 2021

KAZALO VSEBINE

POVZETEK	5
ZAHVALA.....	5
1. UVOD	6
1.1 Namen oz. cilj raziskovalne naloge.....	6
1.2 Hipoteze	6
2. TEORETIČNI PREGLED IN IZSLEDKI DOSEDANJIH RAZISKAV O LASERJIH	7
2.1 Laser	7
2.2 Svetloba iz atomov	7
2.3 Zgradba in delovanje laserja.....	8
2.4 Delovanje laserja	10
2.5 Tri in štirifazni laserji.....	10
2.6 Laserski načini.....	11
2.7 Laserji na osnovi organskih barvil.....	11
2.8 Plinski laserji	11
2.9 Dušikov laser.....	11
3. ZASNOVA IN IZVEDBA LASERJA	14
3.1 Zasnova dušikovega laserja	14
3.2 Zasnova laserske cevi z elektrodami	15
3.3 Zasnova elektronskega vzbujanja	16
3.4 Model laserske cevi in elektronskega vzbujanja	19
3.5 Izdelava laserske cevi in elektronskega vzbujanja.....	19
4. IZVEDBA EKSPERIMENTA IN APLIKACIJA	26
4.1 Preizkus delovanja	26
4.2 Meritve razpršenosti laserskega žarka	30
4.3 Meritve moči izstopne svetlobe	32
4.4 Primerjava moči izstopne svetlobe v odvisnosti od zrcala	33
4.5 Meritev moči laserske svetlobe v odvisnosti od tlaka	34
4.6 Električni izkoristek laserja	35
4.7 Svetlobno črpanje laserjev na osnovi organskih barvil	36
4.8 Laser kot didaktični pripomoček	38
5. OVREDNOTENJE HIPOTEZ.....	39
6. DRUŽBENA ODGOVORNOST.....	40
7. ZAKLJUČEK.....	40

8. LITERATURA IN VIRI	41
8.1 Pisni viri	41

KAZALO SLIK

Slika 1: Kaskadno množenje fotonov pri stimulirani emisiji.....	8
Slika 2: Preprosta shema laserskega delovanja.....	9
Slika 3: Naboj kondenzatorja laserskih naprav sunkovnega laserja in laserja z neprekinjenim valom... 9	9
Slika 4: Energijski nivoji elektronov pri tri in štirifaznih laserjih.....	10
Slika 5: Prikaz elektronskega črpanja na laserju z omejenimi deli.....	12
Slika 6: Stopnje energijskih nivojev dušikovega laserja.....	12
Slika 7: Prikaz časa in valovne dolžine pri prehodih med energijskimi nivoji v dušikovem atomu	13
Slika 8: Blokovna shema eksperimenta.....	15
Slika 9: Načrt priprave pleksi stekla za izvedbo laserske cevi.....	16
Slika 10: Elektronska shema elektronskega vzbujanja.....	17
Slika 11: Časovni potek naboja kondenzatorjev.....	17
Slika 12: 3D model zasnovanega laserja.....	19
Slika 13: Izdelava visokonapetostnih kondenzatorjev.....	20
Slika 14: Izdelava preproste laserske cevi.....	20
Slika 15: Nosilca laserskih oken.....	21
Slika 16: Spajkanje laserske cevi na visokonapetostna kondenzatorja.....	22
Slika 17: Spajkanje iskrišča na visokonapetostni kondenzator.....	22
Slika 18: Podlaga laserja iz pleksi stekla.....	23
Slika 19: Tuljava med visokonapetostnega kondenzatorjema.....	23
Slika 20: Toplotni izmenjevalec za hlajenje plina.....	24
Slika 21: Povezave med laserske cevi z izvorom napajanja in toplotnim izmenjevalcem.....	24
Slika 22: Izdelan laserska cev z dodatnim zrcalom.....	25
Slika 23: Laser med delovanjem.....	26
Slika 24: Pojav fluorescence na belem papirju.....	27
Slika 25: Meritev razelektritve iskrišča z osciloskopom, ki se periodično ponavlja.....	28
Slika 26: Čas polnjenja visokonapetostnih kondenzatorjev.....	28
Slika 27: Meritev laserskih oscilacij z osciloskopom.....	29
Slika 28: Meritev časa trajanja oscilacij po vsaki razelektritvi.....	29
Slika 29: Opazovanje laserske svetlobe z delno prosojnim milimetrskim papirjem.....	30
Slika 30: Oris lasersko osvetljenih odsevov.....	31
Slika 31: Merjenje obsevanosti z UV-Air merilnikom.....	32
Slika 32: Povečano pomnoževanje fotonov s stimulirano emisijo in zrcalom.....	34
Slika 33: Namestitev eksperimenta laserskega črpanja.....	36
Slika 34: Fotonsko črpanje raztopine fluoresceina.....	37
Slika 35: Kaskadno fotonsko črpanje.....	38

POVZETEK

Raziskovalna naloga prikazuje preprosto zasnovo in izvedbo nizkotlačnega dušikovega laserja. Dušikov laser spada med bliskovne plinske laserje v ultravijoličnem področju svetlobe. Te vrste bliskovnih laserjev lahko hitro oddajajo svetlobne žarke v obliki nadzorovanih svetlobnih bliskov.

Prikazan je postopek izgradnje tovrstnega plinskega laserja, razloženo je njegovo delovanje na fizikalnem in kemijskem področju. Izdelan laser zmore energijo do 7 mW ter relativno dobro kvaliteto žarka in ozek prostorski kot razširjanja koherentne svetlobe.

Namen izdelave laserja je predvsem didaktične narave, saj se ob sami izdelavi seznanimo s fizikalnim delovanjem laserja in delovanjem posameznih komponent, prav tako pa je laser zgrajen tako, da so posamezne komponente dobro vidne.

Z izdelanim laserjem lahko opravljamo raznolike raziskave, kot je na primer laserska spektroskopija, laserski daljinomeri in podobno. S preprosto zgradbo nizkotlačne plinske komore sem napravil svetlobni resonator za stimulirano emisijo svetlobe s črpanjem inverzne populacije na osnovi visokonapetostne razelektritve.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil svojemu mentorju in profesorju fizike na srednji šoli, ki me je med raziskovalno nalogo spodbujal in usmerjal. Zahvaljujem se tudi profesorici kemije, ki je v meni vzpodbudila zanimanje za kemijo. Prav tako bi se rad zahvalil staršem, ki sta me spodbujala. Zahvaljujem se fakulteti, ki mi je posodila delovni prostor ter nekaj merilnih aparatov.

1. UVOD

1.1 Namen oz. cilj raziskovalne naloge

Osnovna ideja za raziskovalno nalogo je bilo eksperimentiranje z lasersko spektroskopijo, za katero potrebujemo laser povprečne moči. Med iskanjem laserja z ustrezno močjo sem naletel na lasersko cev na ogljikov dioksid. Načeloma se tovrstni laserji uporabljajo za rezanje kovinskih plošč z računalniško vodenimi stroji ter spadajo med laserje z neprekinjenim valom. Ko sem se poglobil v tovrstni laser, sem našel številne neustrezne lastnosti. Laserske cevi namreč proizvedejo žarek z dolgovalovnimi fotoni, ki bi bili neustrezni za namen mojega eksperimentiranja. Zraven tega je tudi moč proizvedenega žarka na začetku manj močna in posledično energijsko neenakomerna skozi aktivno stanje delovanja. Ob trenutku meritve je potreben tudi kratek normiran energijski pulz laserskega žarka. Te lahko pridobimo le z sunkovnimi laserji. Vendar pa so sunkovni laserji relativno dragi. Tako sem si zastavil nalogo, da raziščem zgradbo in delovanje laserja ter ga poskušam sam izdelati.

1.2 Hipoteze

Ob razmišljanju, kako izdelati laser, in raziskovanju njegovega delovanja sem si zastavil določene hipoteze, ki sem jih želel preveriti:

1. Možno je zgraditi nizko močni sunkovni laser iz preprostih sestavnih delov za sorazmerno nizko ceno.
2. Laser lahko služi za didaktične namene, saj je zgrajen tako, da so dobro vidni vsi sestavni deli in spodbuja fizikalno razumevanje.
3. Z laserjem je možno doseči fotonsko črpanje laserjev na osnovi organskih barvil.
4. Laserju je možno povečati moč izstopne svetlobe z dodatnim zrcalom, ki svetlobo ponovno preusmeri skozi lasersko cev.

2. TEORETIČNI PREGLED IN IZSLEDKI DOSEDANJIH RAZISKAV O LASERJIH

2.1 Laser

Beseda laser je angleška kratica (LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), kar v slovenščini pomeni svetlobno ojačenje z stimulirano emisijo sevanja elektronov v atomih.

Stimulirano emisijo je leta 1917 odkril Albert Einstein, medtem ko je delal na stari kvantni teoriji. Stimulirana emisija mikrovalov je bila dosežena s prvim maserjem, katerega sta leta 1953 na Univerziteti Kolumbija zgradila Charles H. Townes, Herbert J. Zeiger in James P. Gordon. Kratica maser v angleščini pomeni *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* oz. ojačevanje mikrovalov s stimulirano emisijo sevanja. Za ta dosežek je Charles Townes pridobil tudi nobelovo nagrado iz fizike. Theodore Maiman je 16. maja 1960 prvič uspešno uporabil laser. Njegov laser je uporabljal robidov kristal in bliskovno luč ter proizvajal svetlobo v infrardeči svetlobi 694 nm valovne dolžine [4].

2.2 Svetloba iz atomov

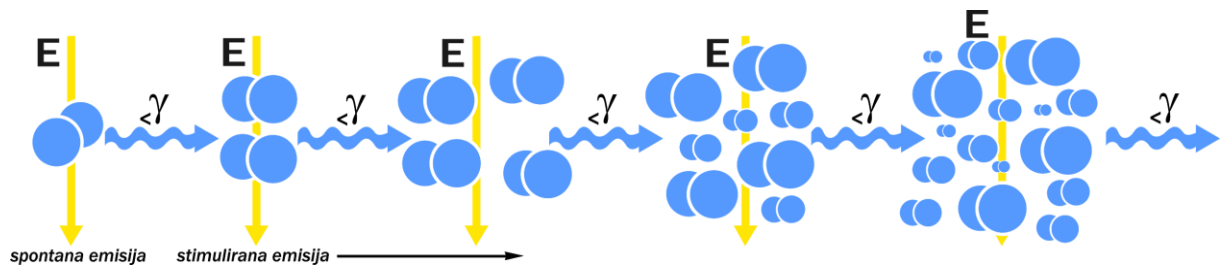
Atomi so nenehno v gibanju, tako translatorno kot rotacijsko. Prav tako so lahko v različnih vzbujenih stanjih, ki jih določajo elektroni iz ovojnice atoma. Vsi atomi lahko imajo osnovno (stabilno) stanje in vzbujeno stanje. Atom se lahko vzbudi zaradi prejema toplote, svetlobe ali električne energije. Ko se elektron vrne v nižje energijsko stanje, odda energijo v obliki fotona. Valovna dolžina oddanega fotona λ je odvisna od spremembe energijskega stanja elektrona ΔW . Zvezo med valovno dolžino in spremembo energije določa naslednja enačba:

$$\lambda = \frac{h \cdot c_0}{\Delta W}, \quad (1)$$

pri čemer je h Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) ter c svetlobna hitrost ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Prehod elektrona iz višjega energijskega stanja na nižje energijsko stanje je lahko spontan ali stimuliran. Spontana emisija se zgodi samodejno sčasoma, medtem ko stimulirano emisijo sproži prejem fotona ustrezne energije, ki posledično izseva dodaten foton enake energije. Če

torej foton z ustrežno valovno dolžino in fazo zadene vzbujen atom ali molekulo, pride do stimulirane emisije, pri kateri se tvorita dva fotona enake energije in faze. Čas prehoda pri stimulirani emisiji je odvisen od lastnosti laserja.



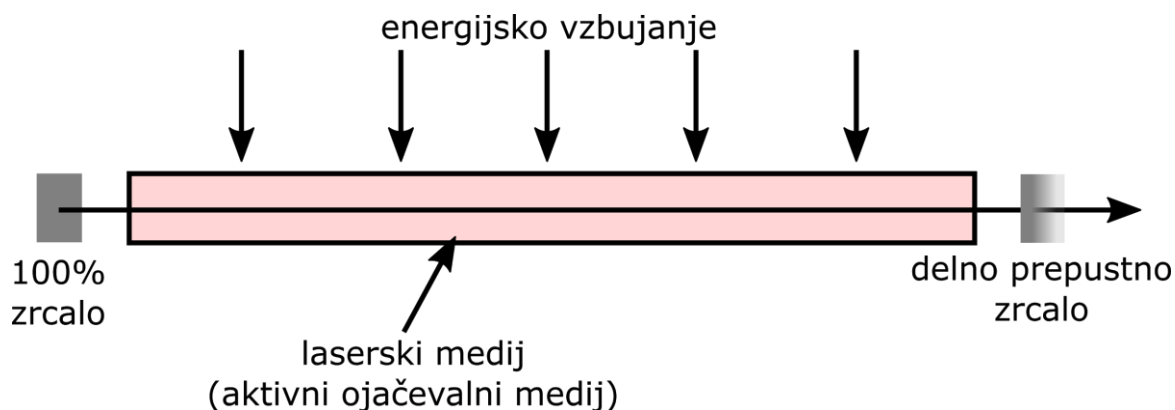
Slika 1: Kaskadno množenje fotonov pri stimulirani emisiji

Pri stimulirani emisiji dobimo koherentno svetlobo, kar pomeni, da je svetloba enake valovne dolžine ter enako polarizirana in ima enak fazni zamik (je sofazna). Na ta način lahko s stimulirano emisijo ojačujemo svetlobo. Če stimulirano emisijo ponavljamo (kaskadno množimo), močno povečamo število fotonov. To dosežemo s pomočjo laserja.

2.3 Zgradba in delovanje laserja

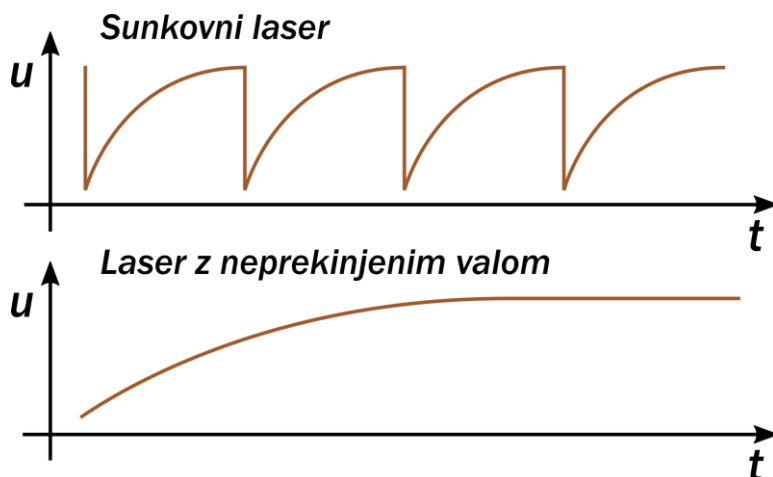
Laser je naprava, v kateri nakopičimo energijo, ki se potem v trenutku sprosti v zelo močnem curku elektromagnetnih valov (svetlobe). Sestavljen je iz treh osnovnih delov (Slika 2):

- sredice oz. medija, ki je kristal ali cev s tekočino ali plinom, kamor dovajamo energijo,
- napajalno napravo, ki lahko proizvaja močne bliske svetlobe ali močne radijske valove (npr. bliskavica) in služi za izvor fotonov,
- resonatorja, ki ustvarja stoječe elektromagnetno valovanje in natančno usmeritev laserskega curka (npr. dve vzporedni zrcali, eno nepropustno, drugo deloma prepustno).



Slika 2: Preprosta shema laserskega delovanja.

Z metodo kaskadnega množenja fotonov dobimo s pomočjo laserja ojačano svetlobo, ki je glede na način delovanja laserja lahko sunkovna ali z neprekinjenim valom.



Slika 3: Naboj kondenzatorja laserskih naprav sunkovnega laserja in laserja z neprekinjenim valom.

Poznamo več vrst laserjev, ki jih delimo tudi glede na:

- vrsto optično ojačevalnega medija (plin, organsko barvilo, polprevodnik, kristali),
- po njihovi moči in načinu delovanja,
- po načinu energijskega črpanja,
- po številu prehodnih faz,
- po valovni dolžini oddane laserske svetlobe.

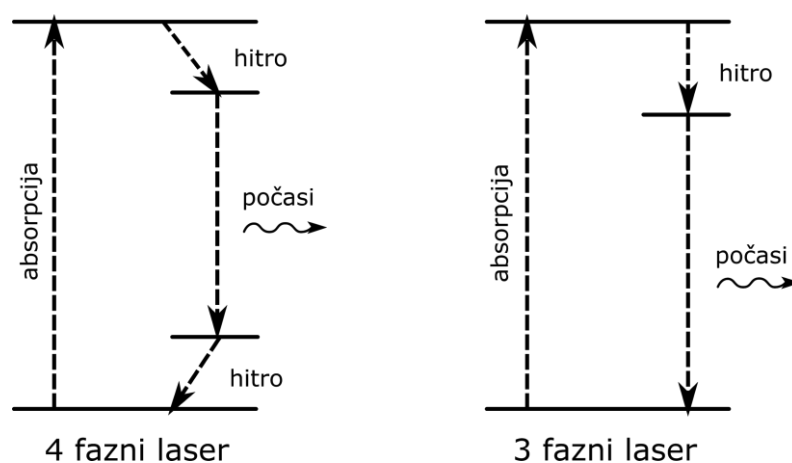
2.4 Delovanje laserja

Svetlobo ojačamo z optično ojačevalnim medijem. To pomeni, da vzbudimo atome ali molekule v laserskem mediju na višji energijski nivo z absorpcijo zunanje energije, ki jo lahko dovedemo z električnim tokom, z virom svetlobe ali kemijsko reakcijo. Atomi ali molekule v vzbujenem stanju tvorijo inverzno populacijo. Inverzno populacijo tvorijo atomi v vzbujenem stanju v laserskem mediju. Razmerje med snovjo v vzbujenem in normalnem energijskem stanju imenujemo inverzija, ki določa svetlobno ojačenje. V splošnem laserskem sistemu se atomi ali molekule vzbudijo do drugega ali tretjega energijskega nivoja nad osnovnim nivojem (3 in 4-nivojski laserji) (Slika 4).

Ko je večina atomov ali molekul v laserskem mediju v vzbujenem energijskem stanju, je ta sposoben svetlobnega ojačenja. Za razliko od ostalih svetlobnih izvorov, pri katerih prihaja do naključne spontane emisije v obliki fotonov, se pri laserskem ojačevanju dogaja stimulirana emisija. Na ta način pride do svetlobnega ojačenja. Proces dvigovanja energijskega nivoja atoma ali molekul imenujemo energijsko črpanje, ki posledično tvori inverzno populacijo kot osnovo za svetlobno ojačenje laserskega medija.

2.5 Tri in štirifazni laserji

Laserje delimo na tri in štirifazne laserje. To je odvisno od kemijskih lastnosti laserskega medija.



Slika 4: Energijski nivoji elektronov pri tri in štirifaznih laserjih.

2.6 Laserski načini

V laserskem žarku lahko imamo prečne elektromagnetne valove. Število in položaj prečnih valov označimo s kratico TEM (Transverse Electromagnetic Modes). Zapišemo ga TEM_{plq} , kjer p predstavlja število radialnih ničelnih polj, l predstavlja število kotnih ničelnih polj in q predstavlja število vzdolžnih ničelnih polj.

2.7 Laserji na osnovi organskih barvil

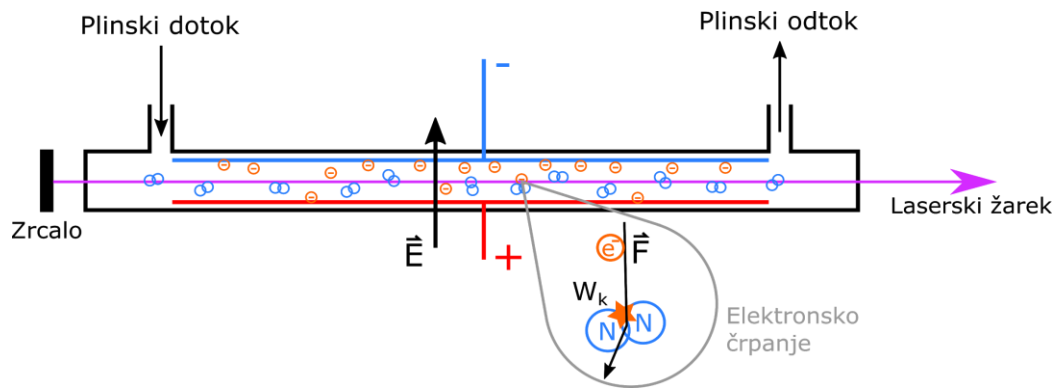
Tovrstni laserji za optično ojačevalni medij uporabljajo organska barvila. Pogosto uporabljena barvila so rhodamin 6G, fluorescein, kumarin. Laserji na osnovi organskih barvil tipično uporabljajo fotonsko črpanje in delujejo na osnovi fluorescence. Večina jih ima zelo kratkotrajno absorpcijo ter emisijo. Pri fotonskem črpanju pogosto uporabljamo izvor ultravijolične svetlobe, saj ima večina tekočih tovrstnih barvil visok prag absorpcije za prehod v vzbujeno energijsko stanje.

2.8 Plinski laserji

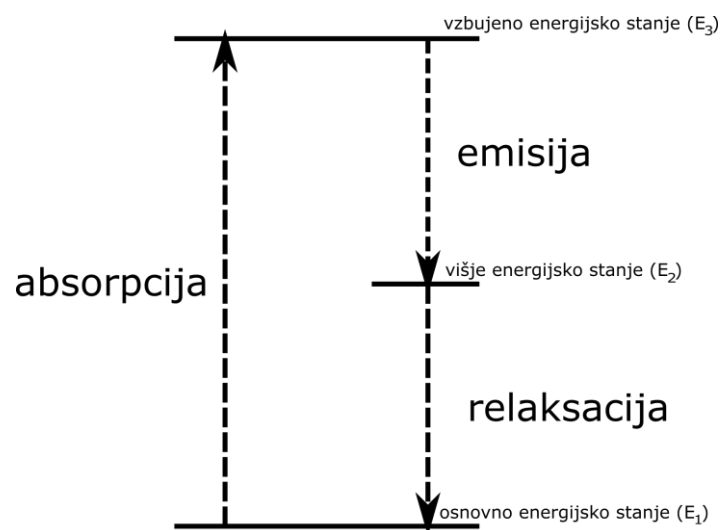
Plinski laserji za optično ojačevalni medij uporabljajo različne pline. Najpogosteje uporabljeni plini so ogljikov dioksid (CO_2), ogljikov monoksid (CO), mešanice žlahtnih plinov, kot so helij (He), neon (Ne) in argon (Ar), dušik (N_2) in mešanice žlahtnih plinov s fluorom (F).

2.9 Dušikov laser

Dušikov laser kot medij za stimulacijo uporablja dušik (N_2) ter ga uvrščamo med plinske laserje. Sodi med 3-nivojske laserje, pri katerem se sprosti foton v svetlobnem spektru pri višjem energijskem prehodu, ko molekula dušika prehaja iz vzbujenega energijskega stanja v višje energijsko stanje (Slika 4). V relaksacijskem stanju se sprosti termični foton. Pri dušikovitih laserjih dosežemo tipično vzbujeno energijsko stanje oz. inverzno populacijo z elektronskim črpanjem. Pri elektronskem črpanju prosti pospešeni elektroni v obliki električnega toka, ki se odcepijo pri ionizaciji plina med elektrodama laserske cevi, trkajo v molekule dušika, pri tem pa molekule dušika absorbirajo njihovo kinetično energijo.

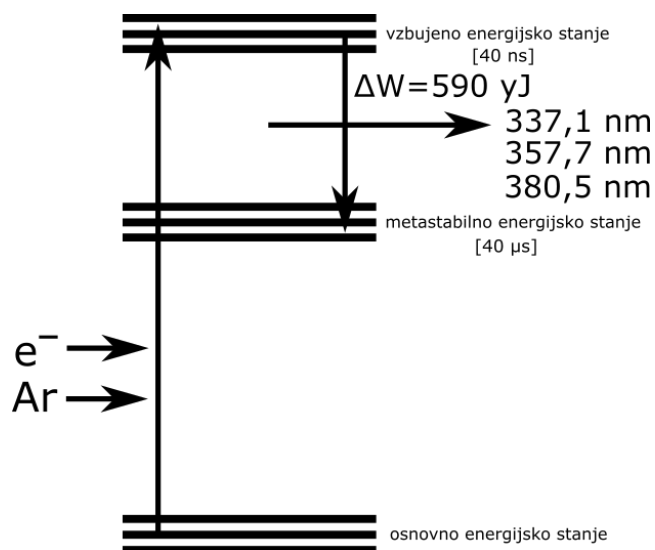


Slika 5: Prikaz elektronskega črpanja na laserju z omejenimi deli.



Slika 6: Stopnje energijskih nivojev dušikovega laserja.

Pri dušikovih laserjih je torej značilna laserska emisija med vzbujenim in višjim energijskim stanjem. Ta znaša okoli 590 yJ ($5,9 \cdot 10^{-22}$ J) (Slika 7).



Slika 7: Prikaz časa in valovne dolžine pri prehodih med energijskimi nivoji v dušikovem atomu

Oddani fotoni v svetlobnem delu spektra imajo posledično valovno dolžino 337,1 nm, kar jih uvršča v področje ultravijolične svetlobe:

$$\lambda = \frac{h \cdot c_0}{\Delta W} = \frac{6,63 \cdot 10^{-37} \text{ m}^2 \text{ kg/s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{590 \cdot 10^{-24}} = 337,1 \text{ nm}. \quad (2)$$

V dušikovitih laserjih navadno nimamo popolnoma čistega dušikovega plina zaradi načina pridobivanja z destilacijo, zato je prisoten tudi argon (Ar). Zaradi elektronske stimulacije argonovih atomov nastanejo argonski ioni, ki prav tako trkajo v dušikove molekule in zato prihaja do absorpcije njihove energije. Zaradi navedenih nečistoč in kvantne nesigurnosti energijskega položaja elektronov prihaja do odstopanj energijskih prehodov, kar povzroči odstopanje od centralne valovne dolžine.

Elektronsko vzbujanje oz. ustvarjanje inverzne populacije lahko dosežemo z razelektritvijo električnega naboja. Pri razelektritvi naboja pride do kratkotrajnega električnega toka kot toka pospešenih elektronov, ki nastanejo ob ionizaciji plina. Pospešitev elektronov dosežemo z močnim električnim poljem kot posledico velike napetostne razlike med elektrodama laserske cevi. Pri trku dušikove molekule s prostim pospešenim elektronom se zgodi absorpcija njegove energije in zato elektron iz zunanje ovojnice dušikovega atoma prejme energijo, kar dvigne njegovo energijsko stanje. Ta pojav se idealno zgodi čez celoten plin v laserski cevi. Prvi elektron s spontano emisijo odda foton, ki povzroči spontano emisijo na ostalih vzbujenih

dušikovih molekulah. Tako nastane stimulirana emisija svetlobe, pri kateri vzbujene molekule dušika oddajajo pomnoženo število fotonov iste valovne dolžine in faze. Ustvari se tako imenovano kaskadiranje, kjer nastali fotoni povzročajo stimulirano emisijo vzbujenih dušikovih molekul. Nastala svetloba je koherentna, kar pomeni, da ima enako polarizacijo, enako valovno dolžino ter konstantni fazni razmik (Slika 1).

Dolžina pulza laserske svetlobe je pri dušikovem laserju odvisna od tlaka plina v laserski cevi. Stimulirana emisija fotonov oziroma svetlobni impulz navadno traja le 5 do 10 ns, kot to podaja na osnovi opazovanj [2] pridobljena empirična enačba

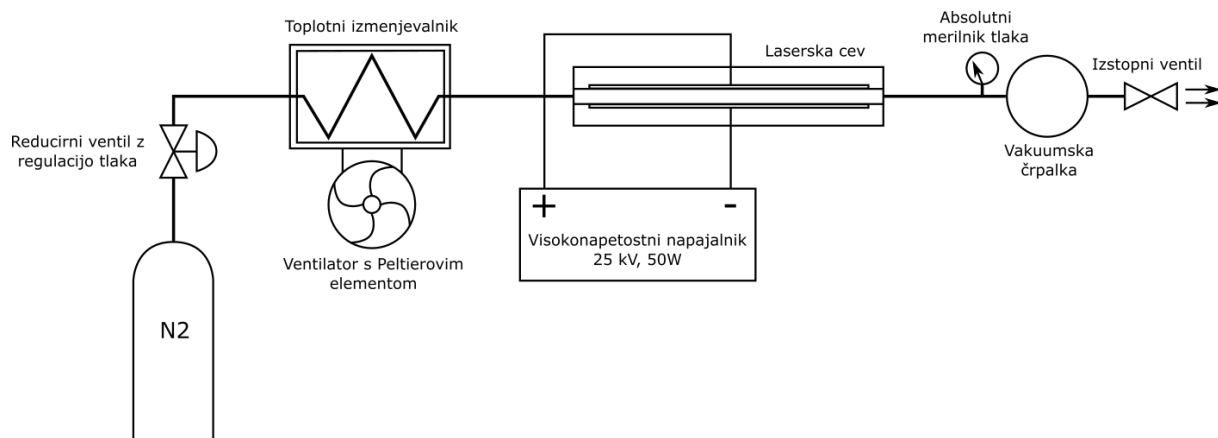
$$t[ns] = 36 / (1 + 12.8 \cdot p[bar]) . \quad (3)$$

Dolžina časa vzbujenega energijskega stanja upada z višanjem tlaka in znaša največ 40 ns pri zelo nizkem tlaku. Dolžina relaksacije od višjega do osnovnega energijskega stanja pa 40 μ s.

3. ZASNOVA IN IZVEDBA LASERJA

3.1 Zasnova dušikovega laserja

Kot zasnovo dušikovega laserja sem izbral preprost koncept [10], ki je prikazan na blokovni shemi eksperimenta. Dušikov plin kot laserski medij črpamo iz visokotlačne jeklenke, v kateri se plin nahaja v tekočem stanju pod visokim tlakom. Za zmanjšanje visokega tlaka na nizki tlak, ki je potreben za delovanje laserja, skrbi reducirni ventil z natančno nastavitvijo izstopnega tlaka plina. Sistem sem zasnoval kot preprost odprt sistem brez kroženja plina in s preprostim izpustom plina v okolje preko izstopnega ventila. V ta namen je dodana vakuumška črpalka, ki s črpanjem poskrbi, da lahko dosežem primerni absolutni tlak okoli 100 mbar. Ker je dušik inerten plin, njegovo neposredno izpuščanje v prostor v majhnih količinah ni škodljivo za zdravje.

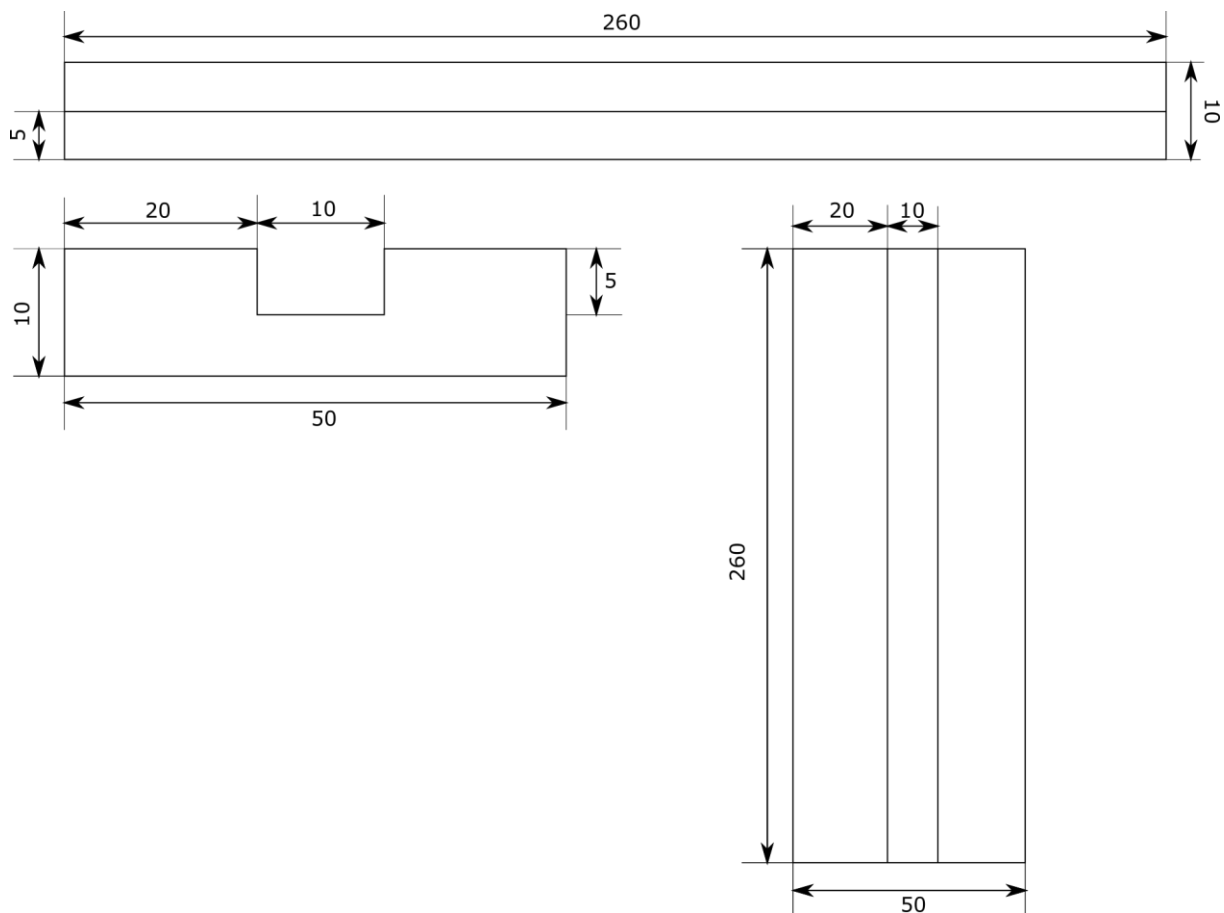


Slika 8: Blokovna shema eksperimenta.

Vakuumska črpalka najprej ustvari podtlak zato, da se v sistemu nahaja zgolj dušikov plin iz jeklenke. Kasneje pa z natančno nastavitvijo reducirnega ventila lahko nastavimo želeni tlak. Za prikaz tlaka v sistemu skrbi absolutni merilnik tlaka, ki pomaga pri natančnem nadzoru tlaka plina v sistemu. Da povečam gostoto plina v laserski cevi, medtem ko ohranjam nizek tlak, sem v sistem dodal električni hladilnik plina. Višja gostota plina omogoča večjo inverzno populacijo, saj je prisotnih več molekul plina v danem prostoru. Ohlajen plin potuje skozi lasersko cev, na kateri se nahajata elektrodi za električno razelektritev kot način elektronskega vzbujanja inverzne populacije. Za dovajanje električne energije do laserske cevi pa skrbi visokonapetostni napajalnik.

3.2 Zasnova laserske cevi z elektrodami

Kot zasnovo za izvedbo laserske cevi sem zbral izjemno preprost koncept, ki temelji na obdelavi pleksi stekla za izdelavo plinske cevi in bakrene pločevine za izdelavo elektrod. Lasersko cev sestavljata dva kosa iz pleksi stekla, ki ju zložimo eno na drugo, pri tem pa med njiju položimo trakova bakrene pločevine. Pri sestavi je potrebno uporabiti tesnilni silikon, oba kosa pa med seboj privijemo. Na ta način zagotovim tesnjenje vzdolž laserske cevi in stik elektrod z laserskim medijem.

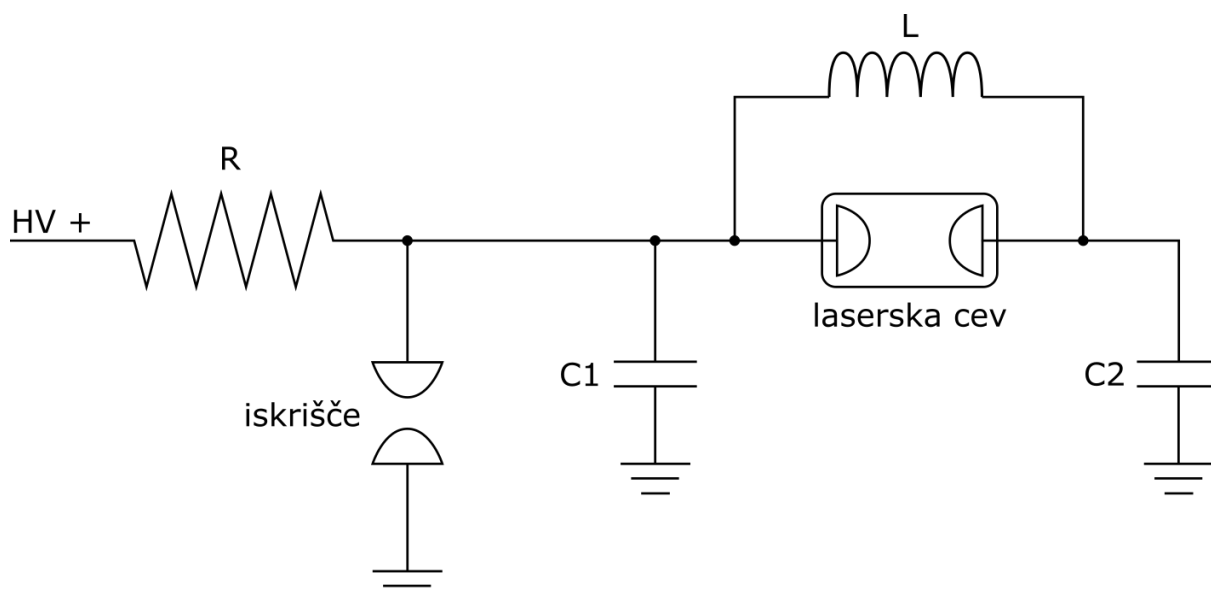


Slika 9: Načrt priprave pleksi stekla za izvedbo laserske cevi.

Skraini odprtini sem zaprl z okroglima okencema iz borosilikatnega stekla. Borosilikatno steklo sem izbral zato, ker zadostno prepušča ultravijolično svetlobo.

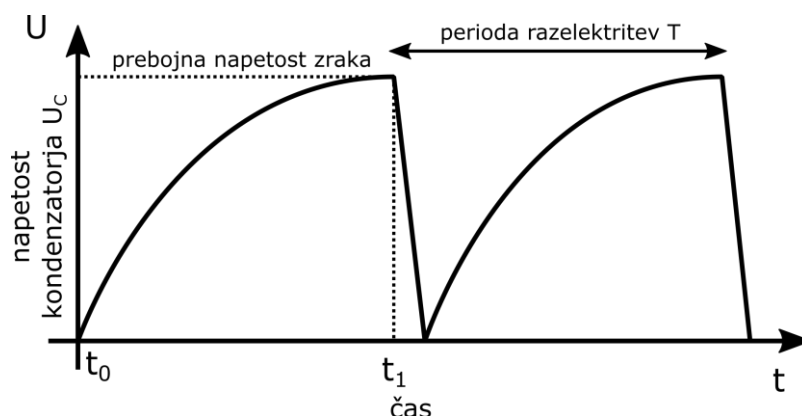
3.3 Zasnova elektronskega vzbujanja

Za elektronsko vzbujanje inverzne populacije sem izbral zasnovo [10], ki temelji na razelektritvi električnega naboja v visokonapetostnih kondenzatorjih (Slika 12). Pri tem konceptu kondenzatorje napolnim z električnim nabojem, ki jih sunkovito razelektrim čez elektrodi laserske cevi in plina med njima. Sunkovito razelektritev dosežem z iskriščem, ki ga v tem primeru predstavlja visokonapetostno stikalo.



Slika 10: Elektronska shema elektronskega vzbujanja.

Visoko napetost do razelektritvenega vezja dovedem iz visokonapetostnega napajalnika. V trenutku t_0 sta kondenzatorja C1 in C2 prazna ter se pričneta polniti z električnim nabojem kot posledica električnega toka iz visokonapetostnega napajalnika (HV – high voltage) in upora R. Upor R omejuje magnitudo električnega toka in posledično hitrost polnjenja obeh kondenzatorjev. Kondenzatorja C1 in C2 sta neposredno povezana na elektrodi laserske cevi ter med seboj s tuljavo L. Z uporabo R vrednosti 10 k Ω dosežem enakomerno polnjenje s konstantnim električnim tokom.



Slika 11: Časovni potek naboja kondenzatorjev.

Ker je polnilni električni tok konstanten, se tuljava L temu ne upira. V trenutku t_1 , ko napetost na kondenzatorjih U_C doseže prebojno napetost zraka v iskrišču, se iskrišče naglo ionizira in

postane električno prevodno. Kondenzator C1 skupaj z uporom R preprečuje, da bi iskrišče zaradi prisotnosti visoke napetosti ostalo nenehno ionizirano oz. prevodno. Posledično se v tem trenutku preko električno prevodnega iskrišča naglo izprazni električni naboj kondenzatorja C1. To povzroči veliko napetostno razliko med elektrodama laserske cevi, saj se induktivnost tuljave L upre hitri spremembi električnega toka in posledično zagotovi, da se naglo izprazni zgolj kondenzator C1. Zaradi visoke napetosti med elektrodama laserske cevi nastane med njima veliko električno polje, ki posledično ionizira plin v laserski cevi, ustvari proste elektrone in jih pospeši v obliki električnega toka. Zaradi trkov teh pospešenih elektronov z dušikovimi molekulami pride do laserskega pojava. Ker sta se kondenzatorja ob opisani razelektritvi izpraznila, je iskrišče postalo ponovno neprevodno in kondenzatorja sta se pričela ponovno polniti s konstantnim električnim tokom preko upora R. To dogajanje razelektritve in polnjenja se samodejno ponavlja s periodo T ($t_1 - t_0$), ki jo določajo upor R, skupna kapaciteta kondenzatorjev C (vsota C1 in C2) ter razdalja med elektrodama iskrišča, ki tudi določa prebojno napetost zraka (3 kV/mm pri 20°C) (enačba 4).

$$U_C = U_{HV} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}) \quad (4)$$

Prebojno napetost zraka določa električna prebojna trdnost zraka kot izolanta ter razdalja med elektrodama. Na prebojno trdnost zraka vplivajo številni parametri, kot so tlak, vlaga, temperatura, itd. Za preprosto izvedbo visokonapetostnih kondenzatorjev sem si zamislil uporabo dvoslojnega tiskanega vezja na osnovi epoksi FR4 materiala dimenzij 300 krat 500 mm in debeline $d = 0,7$ mm z relativno dielektričnostjo $\epsilon_r = 4,7$. Od tega 0,07 mm predstavljata debelini obeh bakrenih slojev tiskanega vezja. Osnovne dimenzije tiskanega vezja temeljijo na zasnovi iz literature [10]. Na robovih tiskanega vezja sem odstranil pas bakrenih površin širine 20 mm z namenom preprečevanja nezaželenih prebojev. Kondenzatorja C1 in C2 si delita negativno elektrodo v obliki bakrene površine na spodnji strani tiskanega vezja in imata ločeni pozitivni elektrodi v obliki dveh ločenih bakrenih površin na zgornji strani tiskanega vezja s površinama $S = 5,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$. Iz površine, razdalje in relativne dielektričnosti uporabljenega materiala lahko izračunamo kapacitivnost [9] kot

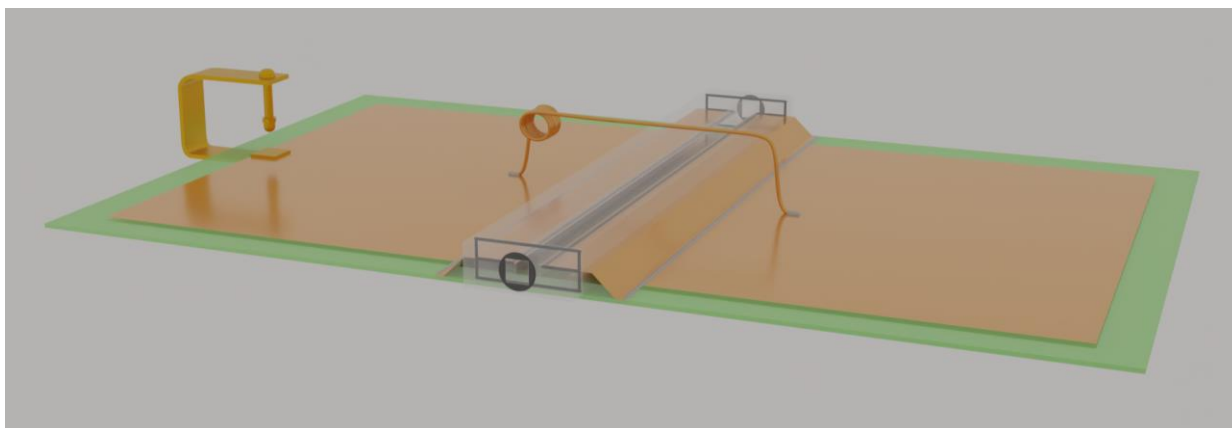
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} = \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 4,7 \cdot 5,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}{6,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}} = 3,79 \text{ nF}. \quad (5)$$

Bakrene površine tvorijo kondenzatorja C1 in C2, pri tem ima posamezen kondenzator kapacitivnost 3,79 nF (enačba 5). Zaželeno induktivnost tuljave 10 μH sem povzel iz literature [10]. Zračno tuljavo sem načrtal s pomočjo literature [9] in jo izdelal tako, da sem okoli plastične cevi premera 18 mm navil 12 navojev izolirane bakrene žice premera 1 mm in dolžino tuljave prilagodil na 20 mm. Po izdelavi sem tuljavo snel s plastične cevi. Če upoštevamo relativno permeabilnost zraka μ_r kot 1, induktivnost izdelane tuljave znaša:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l} = \frac{1,257 \cdot 10^{-6} \text{H/m} \cdot 1 \cdot 12^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{m}^2}{0,02 \text{m}} = 9,2 \mu\text{H}. \quad (6)$$

3.4 Model laserske cevi in elektronskega vzbujanja

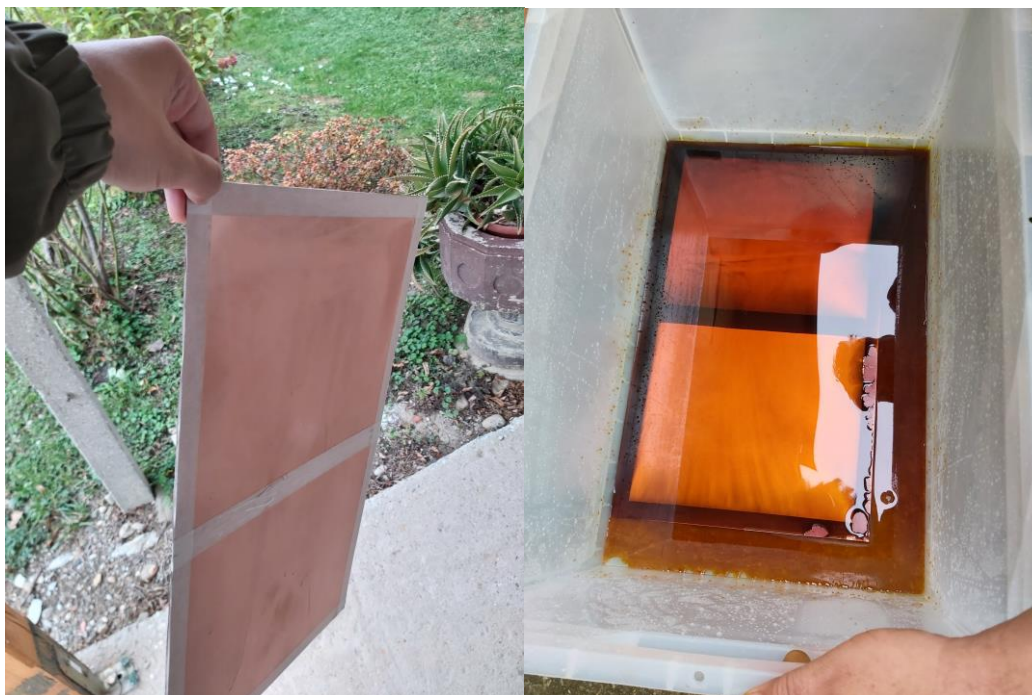
Za lažje razumevanje zasnove preprostega dušikovega laserja sem pripravil 3D model. Izoblikoval in upodobil sem ga v brezplačnem programu za 3D modeliranje Blender. Senčen 3D model prikazuje slika 12.



Slika 12: 3D model zasnovanega laserja.

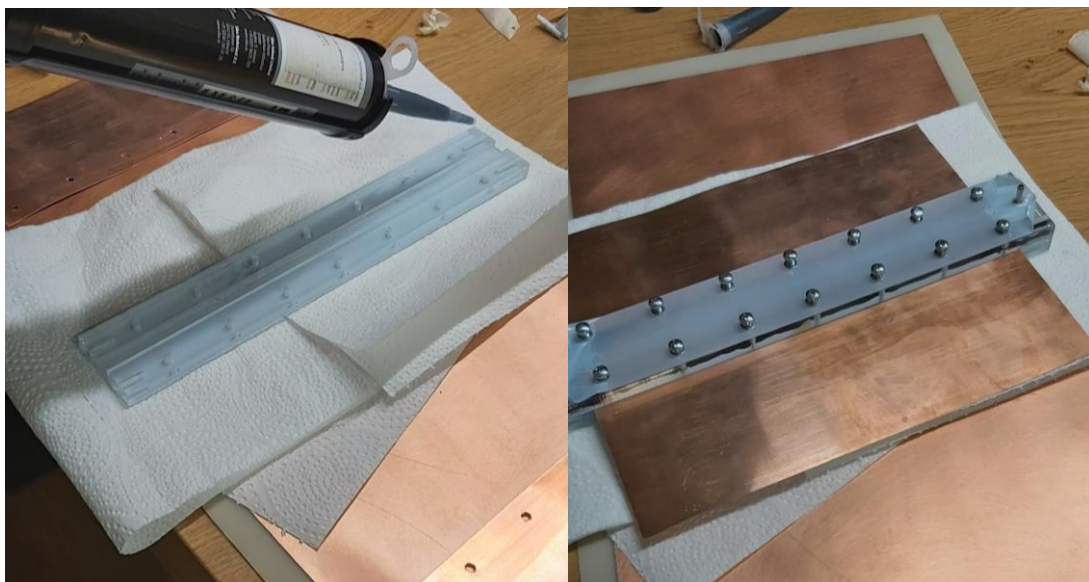
3.5 Izdelava laserske cevi in elektronskega vzbujanja

Na osnovi zastavljenega načrta sem izdelal lasersko cev z elektrodama in vezje za elektronsko vzbujanje z razelektrivijo. Najprej sem izdelal visokonapetostna kondenzatorja iz dvoplastnega tiskanega vezja. Elektrode visokonapetostnih kondenzatorjev v obliki bakrenih površin sem odmaknil od robov zato, da sem zagotovil ustrezno prebojno trdnost in preprečili nezaželene ionizacije. Izdelano tiskano vezje sem dodatno polakiral za zaščito bakra pred oksidacijo.



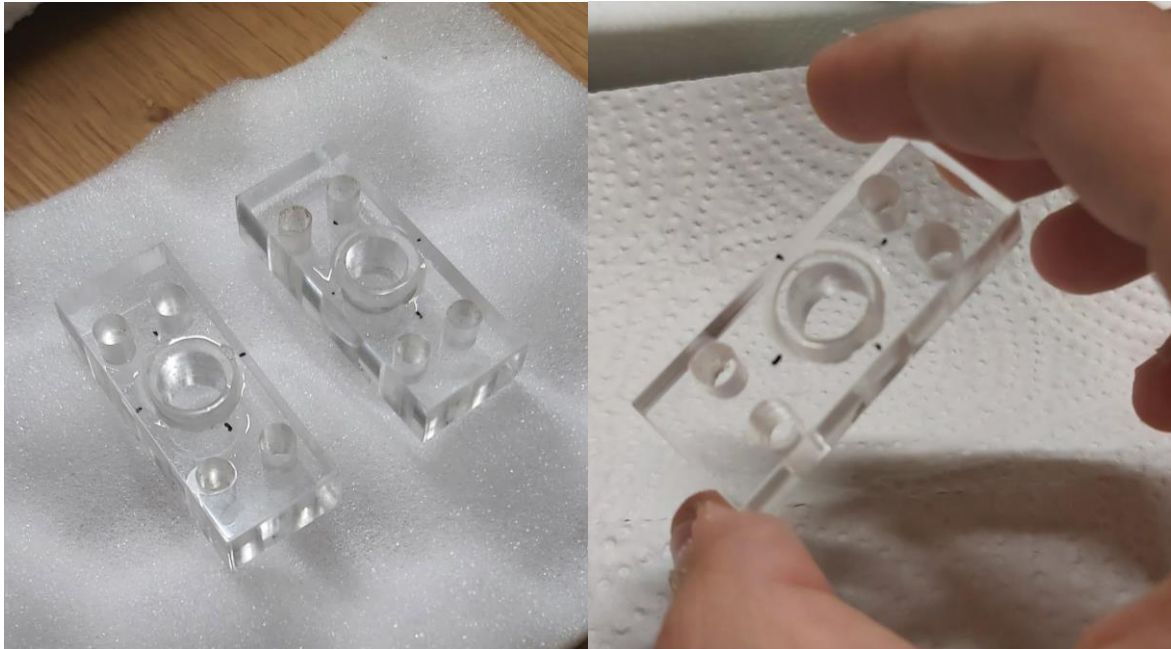
Slika 13: Izdelava visokonapetostnih kondenzatorjev.

Nato sem izdelal lasersko cev z bakrenima elektrodama. Kot osnova za lasersko cev sta bila uporabljena obdelana kosa pleksi stekla, za elektrode pa je bila uporabljena bakrena pločevina.



Slika 14: Izdelava preproste laserske cevi.

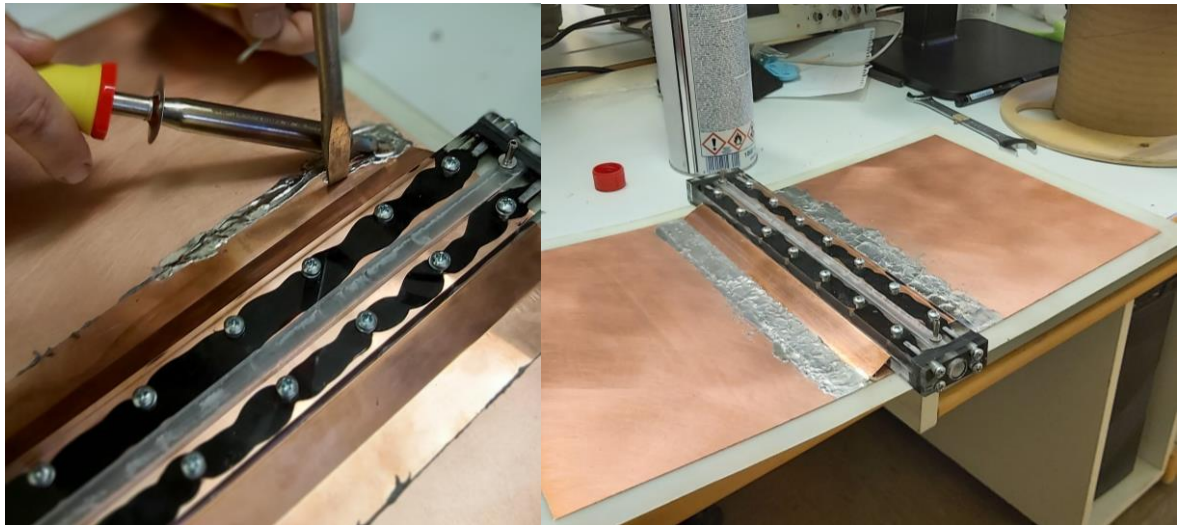
Pri sestavi preproste laserske cevi je bilo potrebno zagotoviti tesnjenje, kar sem dosegel s tesnilno maso. Sestavne dele sem med seboj privili. Na zgornji strani laserske cevi sem izvrtal dve odprtini za priklop plina.



Slika 15: Nosilca laserskih oken.

Skrajne strani laserske cevi sem zaprl in zatesnil z nosilci laserskih oken. Nosilca laserskih oken sem privili na cev. Laserska okna iz borosilikatnega stekla pa sem prilepil na nosilce. Za izvedbo laserskega okna je bilo izbrano borosilikatno steklo, saj prepušča ultravijolično svetlobo. Navadno silicijevo stekelce bi imelo preveč izgub.

Tako izdelano preprosto lasersko cev z elektrodama in laserskima okencema sem nato pritrtil na izdelana visokonapetostna kondenzatorja v obliki tiskanega vezja. Pritrditev sem izvedel tako, da sem obe elektrodi prispajkal na pozitivni elektrodi obeh kondenzatorjev.



Slika 16: Spajkanje laserske cevi na visokonapetostna kondenzatorja.

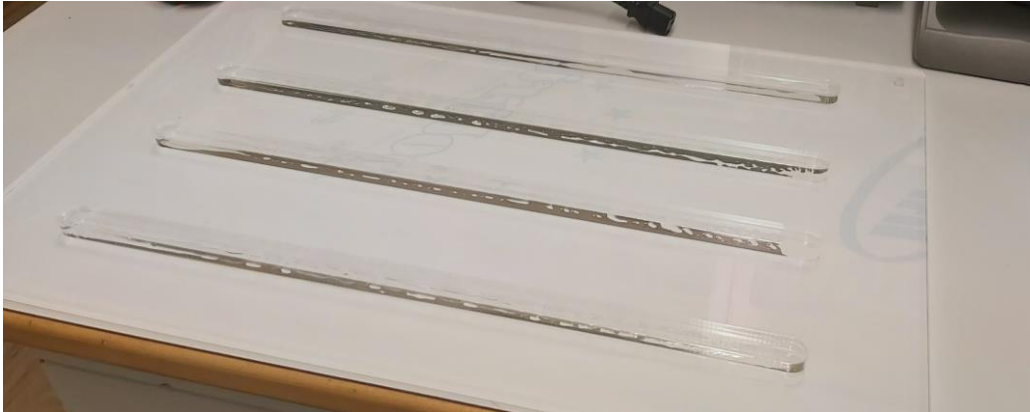
Za izdelavo iskrišča kot visokonapetostnega stikala sem uporabil trak medeninaste pločevine in medeninast vijak z matico. Medenina je bila uporabljena zato, ker je dobro prevodna in se dobro spajka na bakrene površine.



Slika 17: Spajkanje iskrišča na visokonapetostni kondenzator.

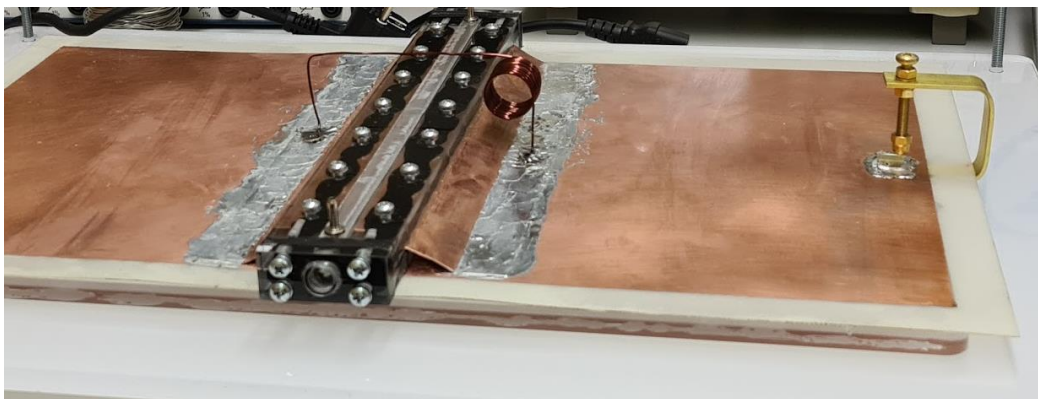
Medeninast trak služi kot negativna elektroda in je prispajkan na skupno negativno elektrodo visokonapetostnih kondenzatorjev tiskanega vezja. Majhen del medeninastega traka sem odrezal in prispajkal na pozitivno elektrodo kondenzatorja C1. Ta del služi kot termična zaščita pozitivne elektrode kondenzatorja C1, saj so bakrene površine debeline zgolj 35 μm . Na ta način zaščitim tanko bakreno površino med ioniziranim stanjem iskrišča, saj se v obratnem

primeru bakrena površina sčasoma upari. Z vijakom in matico lahko nastavljamo režo iskrišča oziroma razdaljo med pozitivno in negativno elektrodo. Ta razdalja določa prebojno napetost izdelanega iskrišča in hkrati določa največjo napetost na kondenzatorjih.



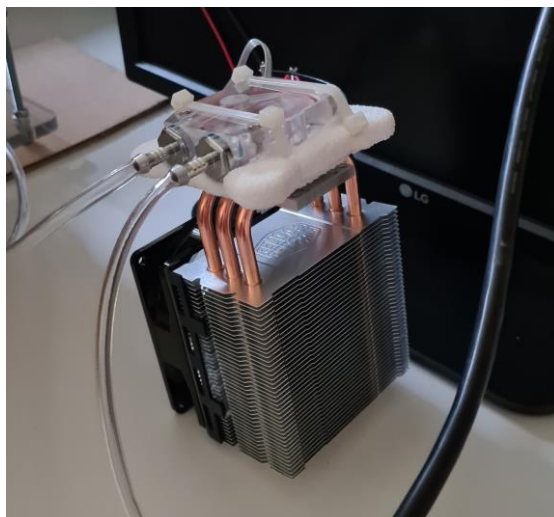
Slika 18: Podlaga laserja iz pleksi stekla.

Izdelano lasersko cev in visokonapetostne kondenzatorje z iskriščem sem namestil na podlago iz pleksi stekla z namenom zaščite pred visoko napetostjo.



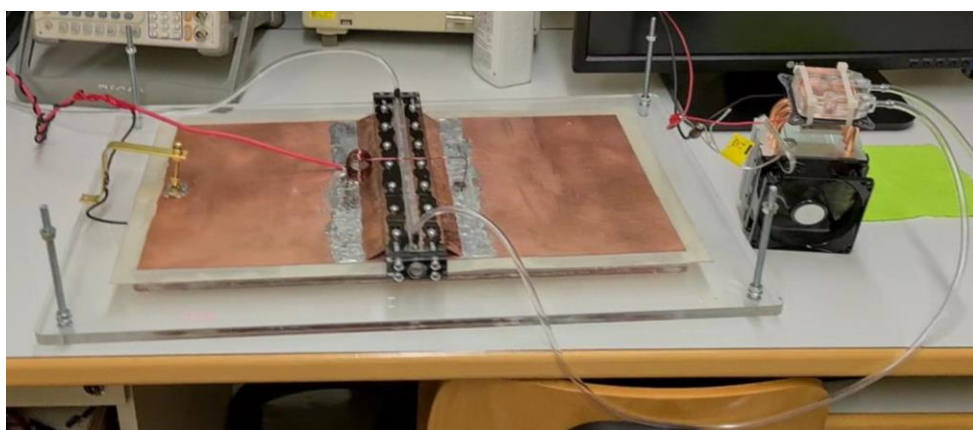
Slika 19: Tuljava med visokonapetostnega kondenzatorjema.

Za izvedbo tuljave sem uporabil lakirano bakreno žico debeline 1,2 mm. Tuljavo sem izdelal tako, da smo 12 navojev bakrene žice navili na cev premera 18 mm.



Slika 20: Toplotni izmenjevalec za hlajenje plina.

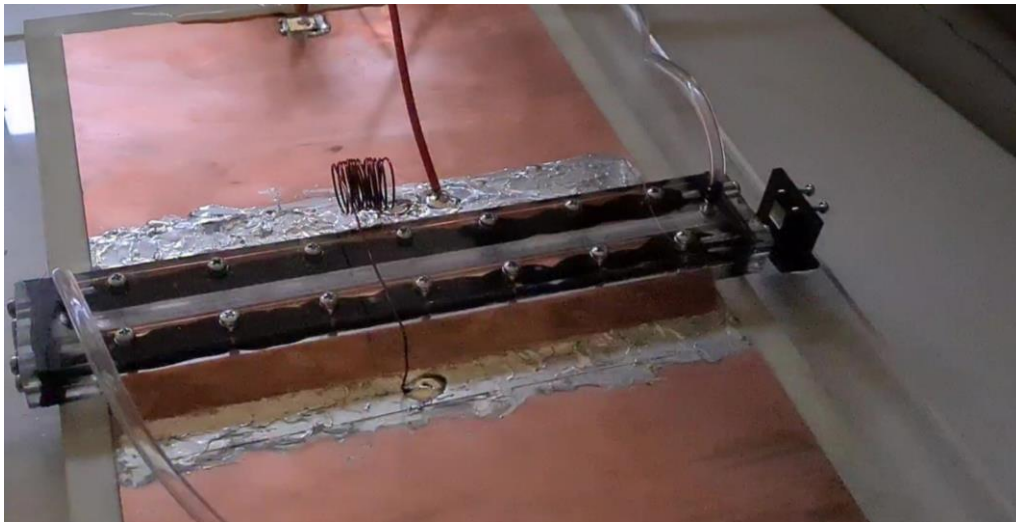
Za ohlajanje plina sem izdelal preprosti toplotni izmenjevalec na osnovi uporabe vodnega hladilnega bloka in zračnega hladilnika za računalniške procesorje v osebnih računalnikih. Med bakrenima površinama hladilnega bloka in zračnega hladilnika sem namestil Peltierjev element, ki služi toplotnemu črpanju med hladilnim blokom in zračnim hladilnikom. Peltierjev element na osnovi termoelektričnega učinka ohlaja eno stran in segreva drugo, pri tem pa za svoje delo v obliki toplotnega črpanja potrebuje električno napajanje. S tem se posledično hladilni blok ohlaja, toplota pa se prenaša na zračni hladilnik, ki se prisilno ohlaja z ventilatorjem. To mi omogoča hlajenje dušikovega plina preden vstopi v lasersko cev na temperaturo, ki je nižja od okolice. S tem plinu zvišam gostoto.



Slika 21: Povezave med laserske cevi z izvorom napajanja in toplotnim izmenjevalcem.

Vse sestavne dele eksperimenta sem nato medsebojno povezal. Visokonapetostni napajalnik z izhodno napetostjo 25 kV in močjo 50 W kot vir enosmernega toka sem povezal na elektrode visokonapetostnega kondenzatorja C1. Dotok plina iz visokotlačne jeklenke kot vira uplinjenega dušika sem preko reducirnega ventila s cevkami povezal na toplotni izmenjevalec, od tam pa na dotok plina v lasersko cev. Odtok plina laserske cevi pa sem povezal na vakuumsko črpalko z absolutnim merilnikom tlaka. Vakuumsko črpalko uporabljam za črpanje dušikovega plina iz laserske cevi, saj mora laserska cev delovati s podtlakom.

Na koncu sem izdelal preprosto zrcalce velikosti 12 x 12 mm iz plastičnega nosilca in površinsko obdelanega zrcala. Kot osnovo za zrcalo sem uporabil stekleno zrcalo z neparjenim srebrom, ki ima visoko učinkovitost odboja na ultravijolično svetlobo. Zrcalce sem pripravil za eksperiment v namen, da potrdim povečanje moči laserske svetlobe v primeru, če izstopno svetlobo ponovno preusmerim v lasersko cev in s tem dosežem povečano stimulirano emisijo inverzne populacije.



Slika 22: Izdelan laserska cev z dodatnim zrcalom.

Umerjanje zrcala na optično os laserske cevi sem izvedel z laserskim kazalcem tako, da sem laserski kazalec usmeril v lasersko cev in opazovali odboj njegovega žarka na zrcalu.

Izdelan laser sem pred prvim zagonom zaradi varnosti v celoti pregledal in preveril njegovo tesnjenje.

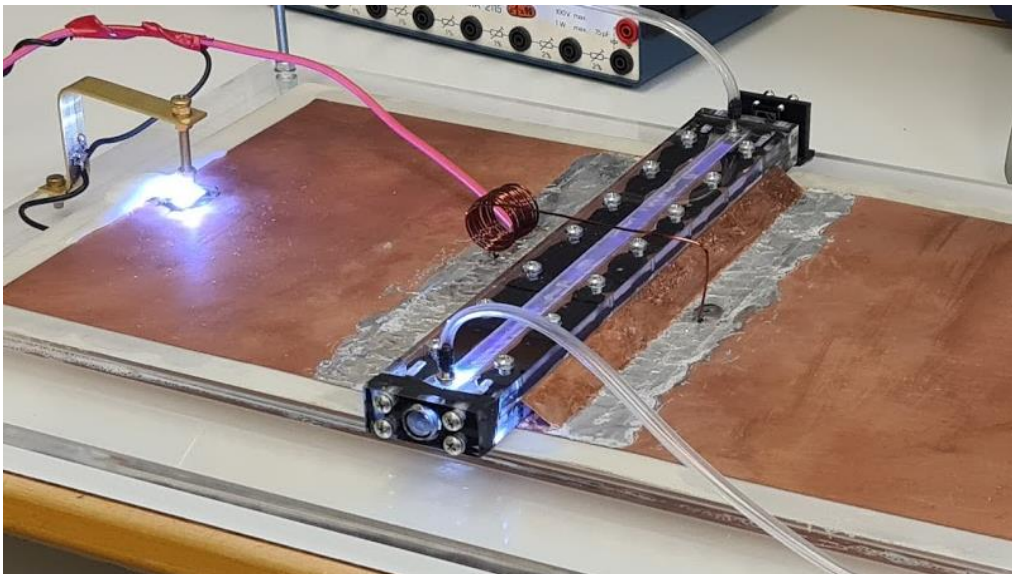
4. IZVEDBA EKSPERIMENTA IN APLIKACIJA

Izdelan laser mi je služil za izvedbo več eksperimentov. Ti vključujejo:

- preizkus delovanja laserja,
- meritve razpršenosti laserskega žarka,
- meritve moči izstopne svetlobe z zrcalom in brez,
- meritve moči pri različnih tlakih dušikovega plina v laserski cevi,
- preizkus svetlobnega črpanja laserjev na osnovi organskih barvil.

4.1 Preizkus delovanja

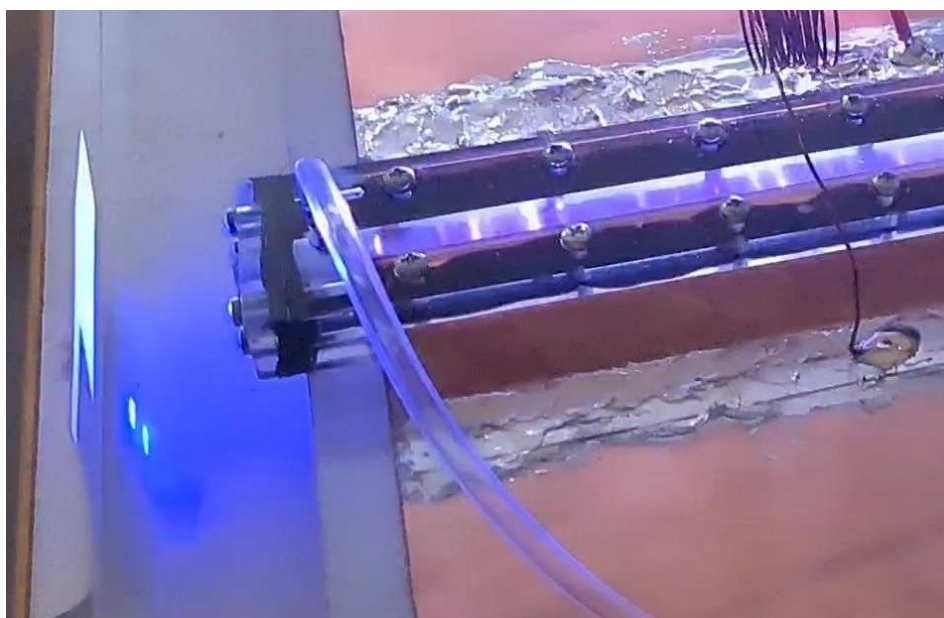
Za pripravo na prvi preizkus delovanja laserja sem razdaljo med elektrodama iskrišča nastavil na 2 mm. Na ta način sem omejil največjo napetost na kondenzatorjih (na približno 6 kV) in posledično njihov naboj. Nato sem vključil hlajenje plina in vakuumsko črpalko ter zaradi varnosti dela z visoko napetostjo preveril prisotnost prevodnih predmetov v skrajni bližini. Ker ima laserska cev zelo majhen volumen ($26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), jo vakuumsko črpalka hitro izprazni. Nato sem odprl reducirni ventil za dotok plina iz jeklenke in ga nastavil tako, da je absolutni merilnik tlaka prikazal 200 mbar. Nato sem vključil visokonapetostni napajalnik in opazoval dogajanje.



Slika 23: Laser med delovanjem.

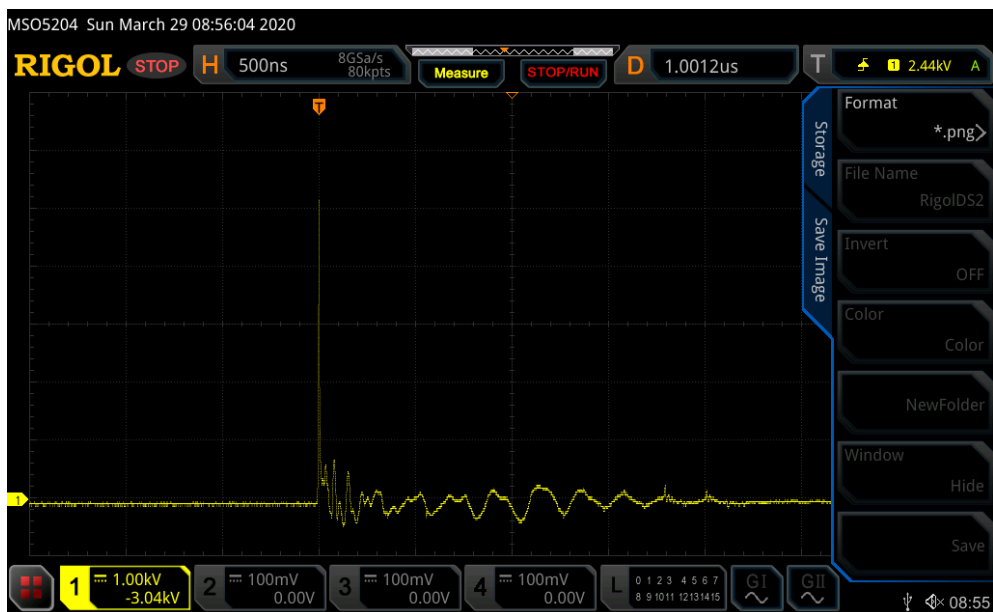
Iskrišče se periodično razelektri z močnim bliskom in glasnim pokom, v laserski cevi pa se pojavi ionizacija plina v vijoličasti barvi. Ker mi vezje omogoča delovanje pri višji napetosti razelektritev, sem se odločil za povečanje razdalje med elektrodama iskrišča na 3,5 mm, kar približno znaša 10,5 kV. Pri večji razdalji med elektrodama iskrišča so se pojavile nenamerne razelektritve izven iskrišča. Zato sem ohranil razdaljo 3,5 mm.

Prisotnost laserskega žarka sem preveril s papirjem, ki sem ga postavil pred laser na optično pot. Ob vsaki razelektritvi se na belem papirju pojavi močna točkasta svetloba vijoličaste barve. Ker laser deluje v ultravijoličnem področju svetlobe, se na papirju vidi učinek fluorescence.



Slika 24: Pojav fluorescence na belem papirju.

Pri tej napetosti sem izmeril periodičnost razelektritev, ki je znašala 20 ms. Periodičnost razelektritev mi določa delovanje uporabljenega visokonapetostnega napajalnika, ki deluje sinhrono z napajalno omrežno napetostjo frekvence 50 Hz (20 ms). Periodičnost razelektritev sem preveril z osciloskopom in visokonapetostno sondo na upor R. Čas polnjenja visokonapetostnih kondenzatorjev in njihova razelektritev preko iskrišča sta izjemno nagla v primerjavi s časom periode.

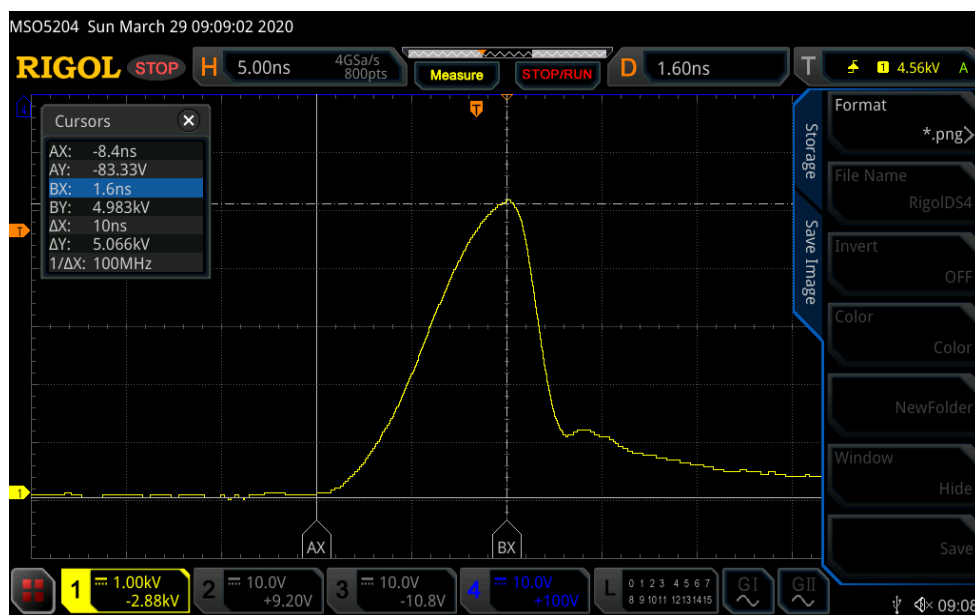


Slika 25: Meritev razelektritve iskriča z osciloskopom, ki se periodično ponavlja.

Pri tej napetosti na visokonapetostnih kondenzatorjih energija razelektritve znaša:

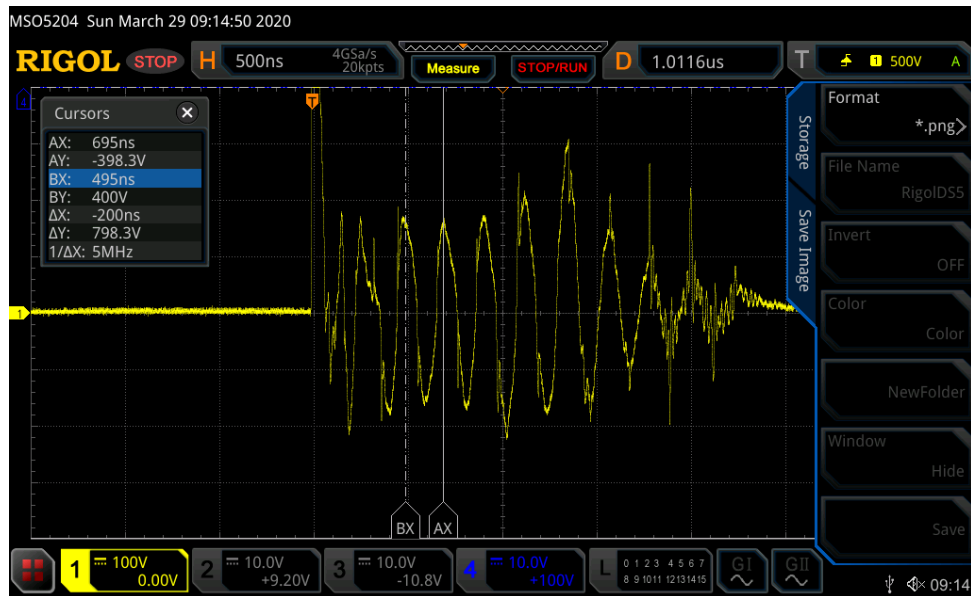
$$W_E = \frac{1}{2} C U^2 = 0,5 \cdot 3,79 \text{ nF} \cdot (10,5 \text{ kV})^2 \approx 2,1 \text{ J} \quad (7)$$

Z osciloskopom sem preverili tudi čas polnjenja visokonapetostnih kondenzatorjev, ki znaša 10 ns.



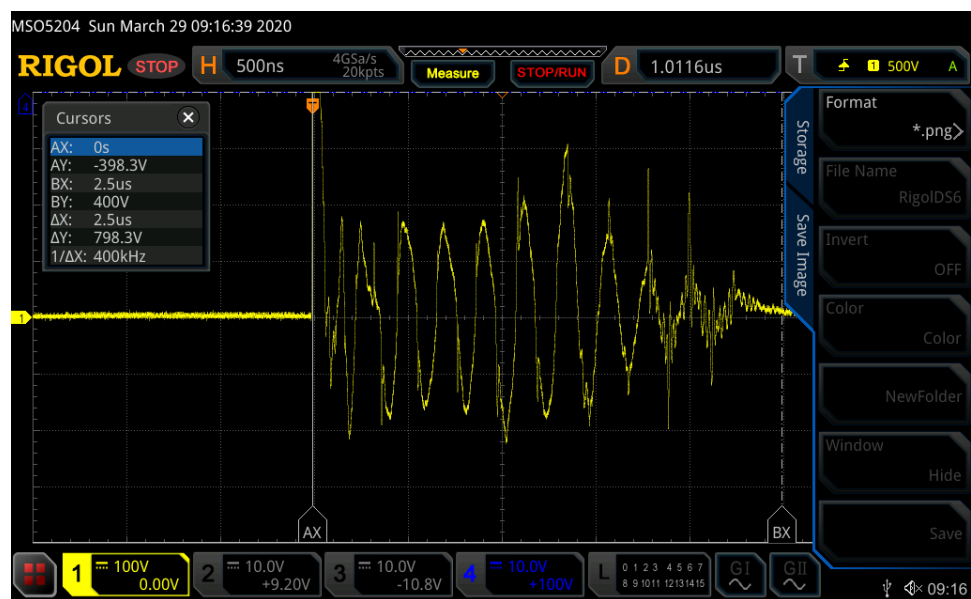
Slika 26: Čas polnjenja visokonapetostnih kondenzatorjev.

Z osciloskopom sem nato izmeril še oscilacije energije v laserski cevi, ki znašajo 500 ns. Iz meritev je razvidno, da se sistem izniha po vsaki razelektritvi, kar kaže na dejstvo, da se po vsaki razelektritvi pojavi niz laserskih pulzov višje energije.



Slika 27: Meritev laserskih oscilacij z osciloskopom.

Po vsaki razelektritvi kondenzatorjev sem v povprečju zaznal okoli 10 oscilacij. Iz tega lahko ocenim moč posameznega pulza laserske svetlobe.

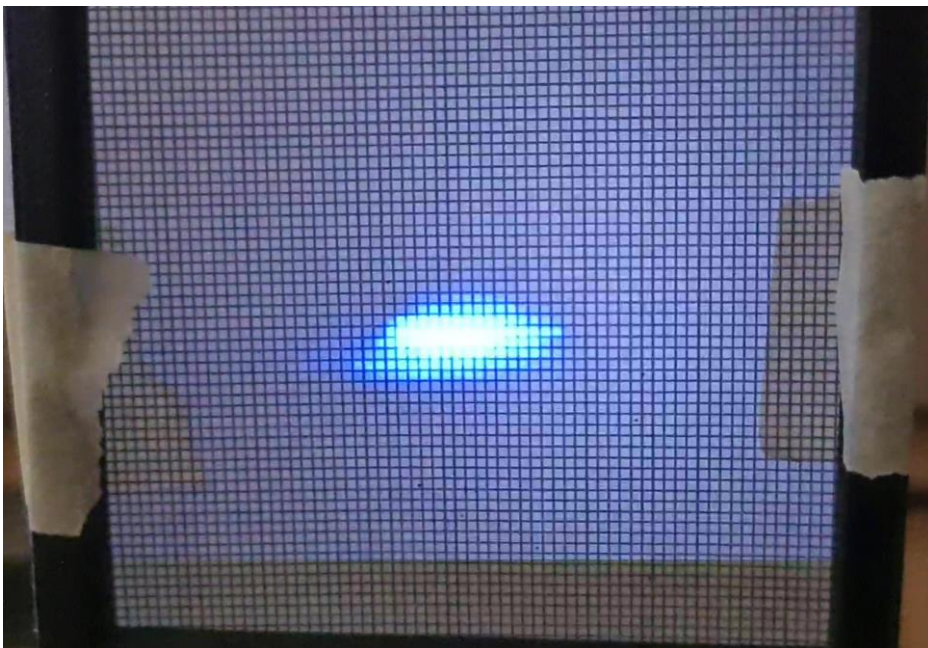


Slika 28: Meritev časa trajanja oscilacij po vsaki razelektritvi.

Prav tako sem z osciloskopom izmeril čas trajanja oscilacij po vsaki razelektritvi, in sicer v trajanju $2,5 \mu\text{s}$.

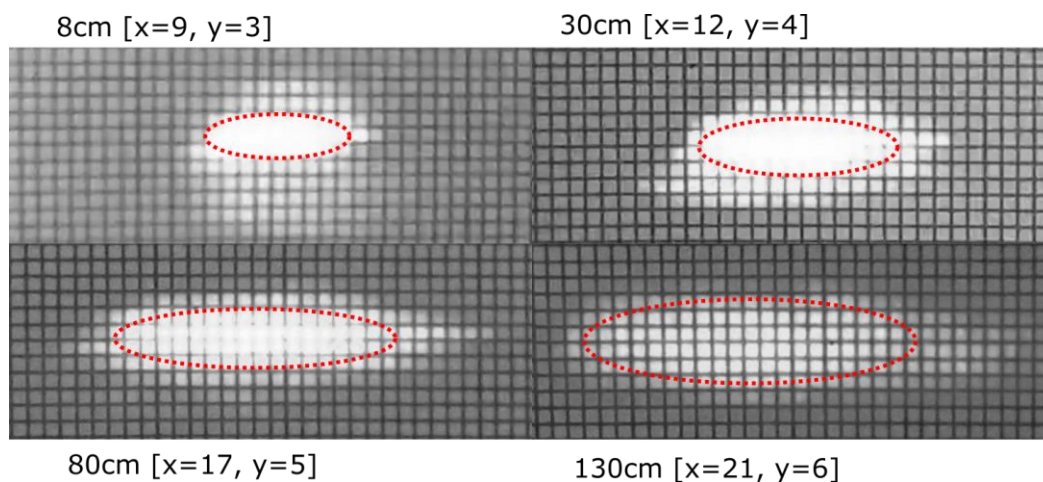
4.2 Meritve razpršenosti laserskega žarka

Za merjenje razpršitve laserskega žarka oziroma njegovega kota razširjanja vzdolž osi potovanja sem si pripravil polprosojni papir, na katerega sem natisnil milimetrsko merilo. Ob vključenem laserju sem na različnih razdaljah vzdolž laserske cevi opazoval velikost svetlobne točke, ki jo laserski žarek osvetli.



Slika 29: Opazovanje laserske svetlobe z delno prosojnim milimetrskim papirjem.

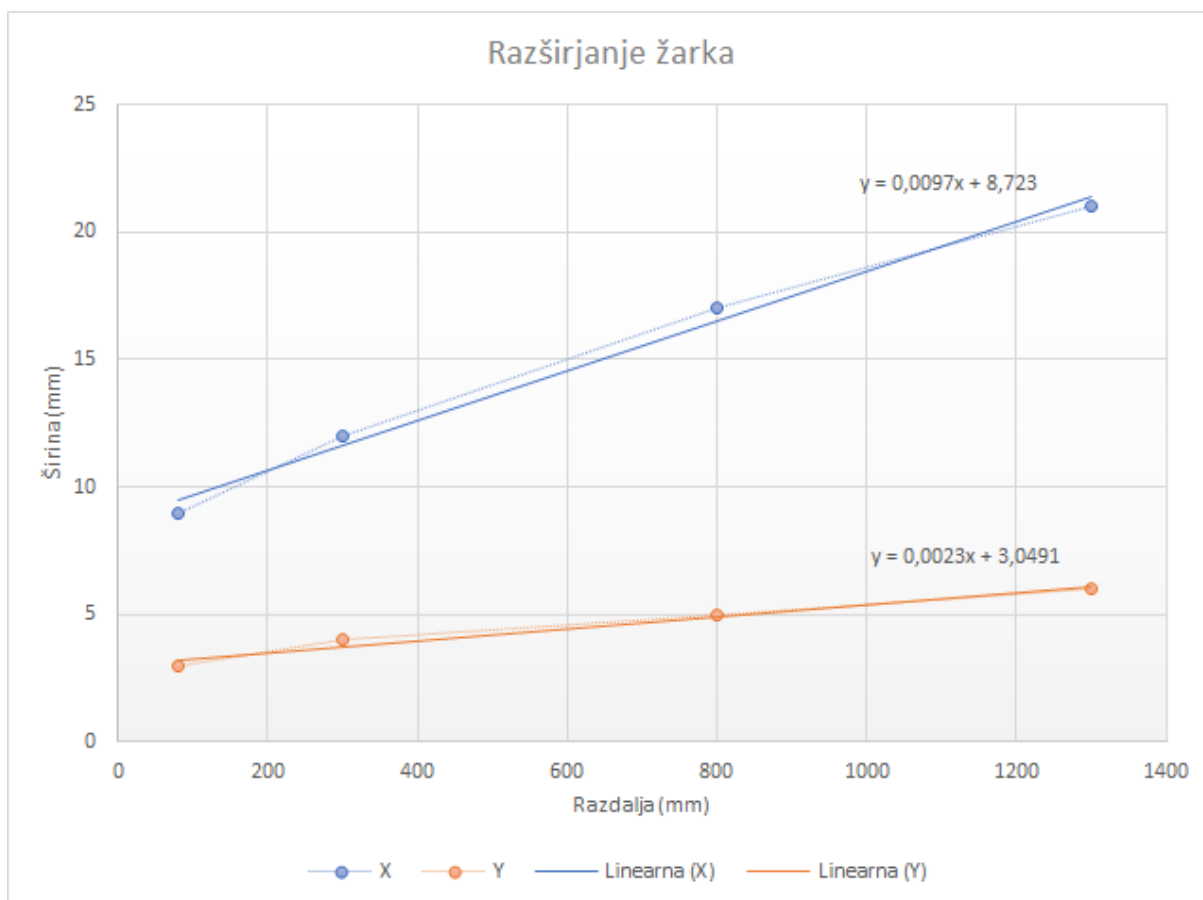
Meritve sem izvedel na štirih različnih razdaljah, in sicer na 80 mm, 300 mm, 800 mm in 1300 mm. Velikost laserske točke oziroma osvetljenih odsevov sem ocenjeval iz pridobljenih slik osvetljenega milimetrskega papirja.



Slika 30: Oris lasersko osvetljenih odsevov.

Odseve sem zaokrožil na elipse in jim določil veliko in malo os. Vrednosti sem vnesel v preglednico Microsoft Excel in izrisal graf odvisnosti velikosti elipse v odvisnosti od razdalje od laserske cevi.

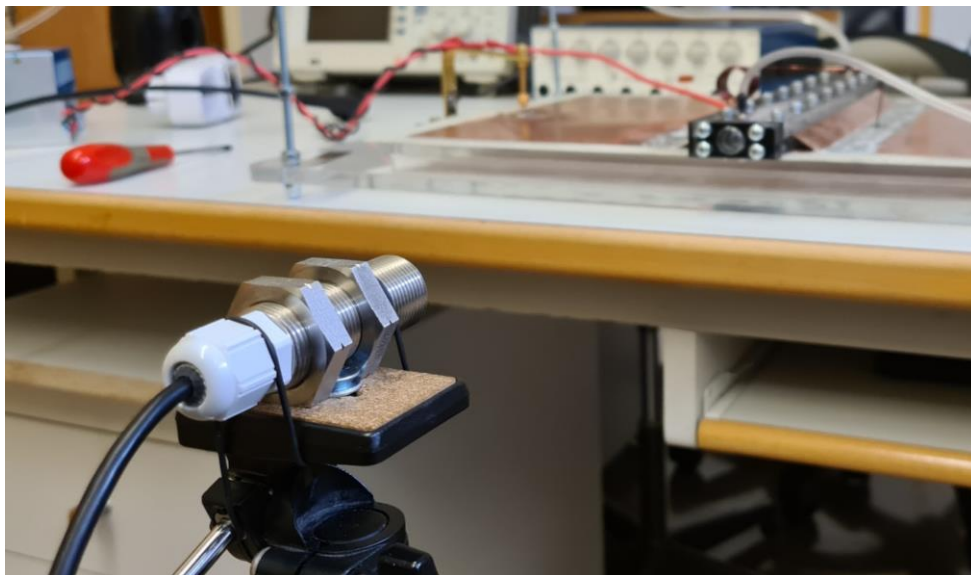
Graf 1: Graf širine in višine laserskega žarka v odvisnosti od razdalje od laserske cevi.



Nad vnesenimi podatki sem uporabil metodo linearne aproksimacije za izračun koeficientov linearnih enačb, ki opisujejo razširjanje laserskega žarka v odvisnosti od razdalje. Iz enačb je razvidno, da je snop svetlobe ob izstopu iz laserja približno 9 mm širok in 3 mm visok. Širina žarka se povečuje za 9,7 mm/m, višina žarka pa za 2,3 mm/m.

4.3 Meritve moči izstopne svetlobe

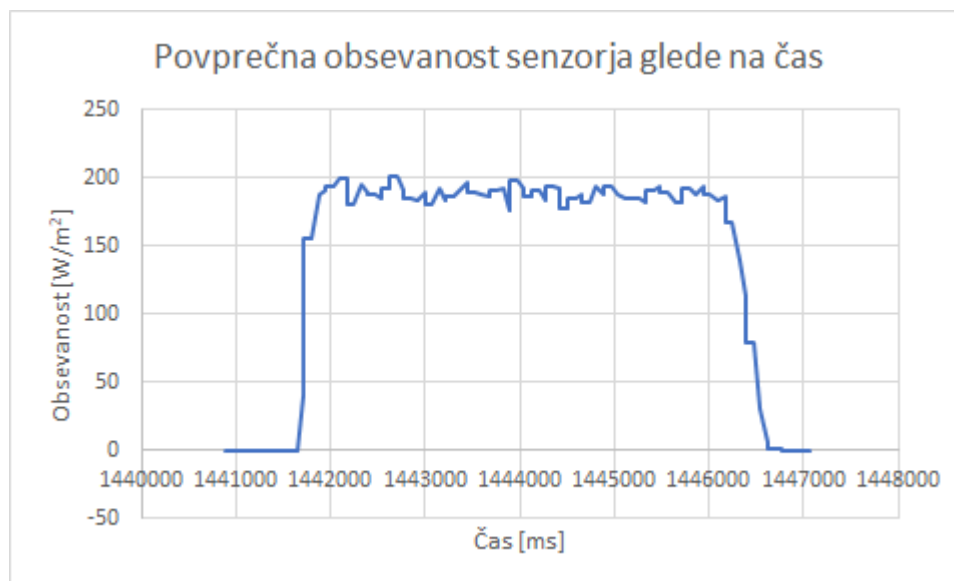
Moč pulzov laserskega žarka sem izmeril zgolj kot povprečno vrednost, saj nisem imel merilnika z zadostno hitrim foto detektorjem. Za meritve povprečne moči pulzov laserskega žarka sem uporabil merilnik UV-Air od podjetja Sglux z ultravijoličnim foto detektorjem. Vse meritve povprečne moči sem izvajal kot meritve obsevanosti senzorja na razdalji 300 mm, saj je na tej razdalji laserski žarek osvetlil celotno foto občutljivo odprtino detektorja.



Slika 31: Merjenje obsevanosti z UV-Air merilnikom.

Omenjen merilnik za svoje delovanje potrebuje USB vmesnik osebnega računalnika, za katerega sem napisal preprost program v programskem jeziku Python. Meritve povprečne obsevanosti merilnik podaja na milisekundo.

Graf 2: Povprečna obsevanost sensorja glede na čas pri tlaku 100 mbar in razdalji 300 mm.



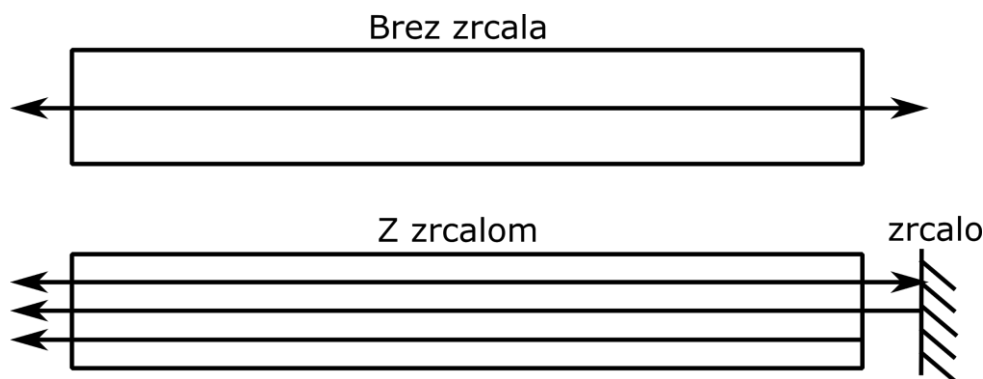
Iz meritev obsevanosti sem moč pulzov laserskega žarka izračunal tako, da smo izmerjene vrednosti obsevanosti pomnožili s prej izmerjeno površino osvetljenega odseva laserskega žarka na razdalji 300 mm. Površino ocenjene elipse na razdalji 300 mm sem izračunal iz odčitanih polosi v prečni ter vzdolžni smeri a in b:

$$S = \pi \cdot a \cdot b = 3,14 \cdot 0,006 \cdot 0,002 = 37,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2. \quad (8)$$

Povprečna obsevanost sensorja pri tlaku 100 mbar je znašala 188 W/m² in zato je bila povprečna moč pulzov laserskega žarka 7,1 mW pri 100 mbar.

4.4 Primerjava moči izstopne svetlobe v odvisnosti od zrcala

Da bi ugotovil razliko izstopnih pulzov laserskega žarka, sem izmeril še obsevanost sensorja ob zakritem zrcalu. Tukaj sem predvideval, da bo moč laserske svetlobe nižja kot v primeru prisotnosti zrcala. Meritev sem opravil pri istem tlaku 100 mbar. Pri odsotnem zrcalu sem izmeril moč 2,45 mW, kar je za 2/3 manj od meritve pri prisotnem zrcalu.



Slika 32: Povečano pomnoževanje fotonov s stimulirano emisijo in zrcalom.

Meritve potrjujejo, da lahko z zrcalom dosežem povečanje moči laserske svetlobe. Z zrcalom dosežem, da se odbita svetloba, ki ponovno vstopi v lasersko cev, pomnoži s stimulirano emisijo.

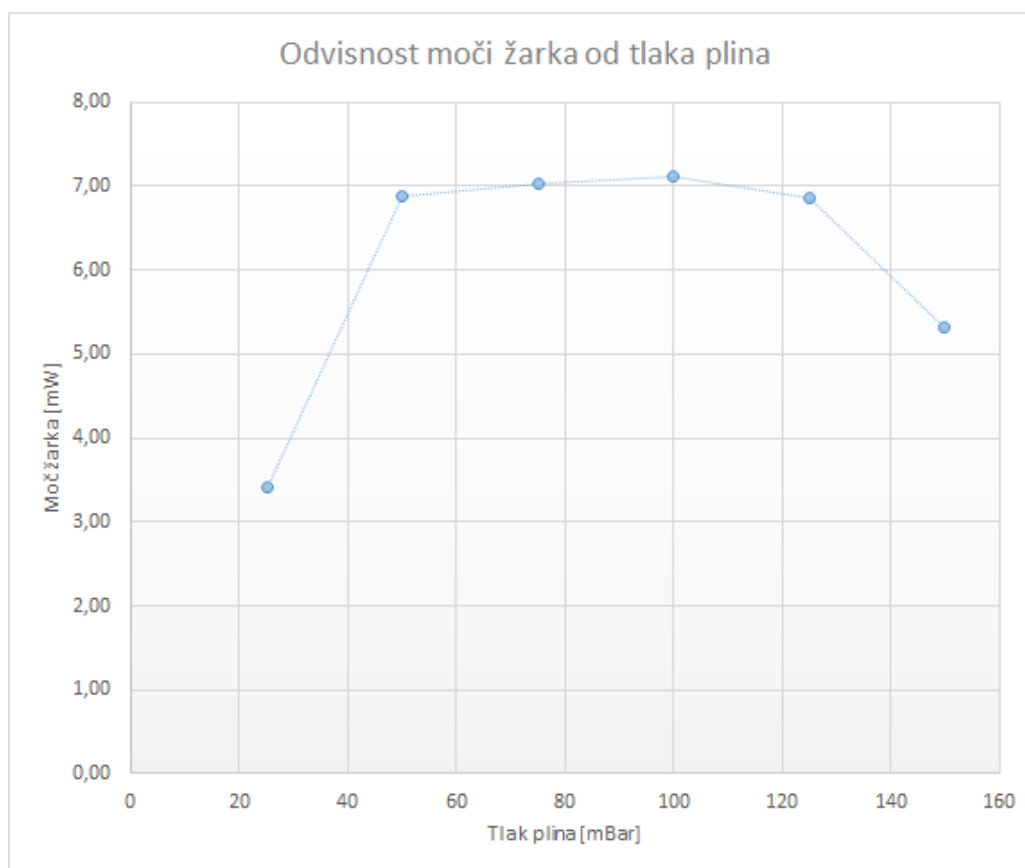
4.5 Meritev moči laserske svetlobe v odvisnosti od tlaka

Po enakem postopku sem izvedel meritve povprečne moči pulzov laserskega žarka v odvisnosti od tlaka dušikovega plina. S pomočjo nastavljivega reducirnega ventila in absolutnega merilnika tlaka sem tlak v laserski cevi spreminjal od 25 mbar do 150 mbar po koraku 25 mbar. Pri tem sem pri vsakem nastavljenem tlaku izmeril povprečno obsevanost senzorja in meritve vnesel v preglednico Microsoft Excel. Meritve obsevanja sem preračunal v moč s pomočjo površine elipse laserskega odseva.

Ugotovil sem, da je idealen tlak za izdelano lasersko cev 100 mbar. Manjši tlak namreč pomeni manjšo gostoto plina, ki zaradi manjše prisotnosti dušikovih molekul povzroči, da pri elektronskem vzbujanju dobimo manjšo inverzno populacijo. Dušikov plin se pri razelektritvi obnaša kot spremenljiv upor. Pri nižjem tlaku imamo manjšo koncentracijo in posledično manjšo električno prevodnost, pri višjih tlakih pa večjo koncentracijo in večjo električno prevodnost. Prevodnost plina sorazmerno vpliva na magnitudo električnega toka ob razelektritvi, pri tem pa je električna moč kvadratično odvisna od toka. Prve tri točke dobljenega grafa prikazujejo kvadratično povečanje moči v odvisnosti od tlaka. Dodatno povečanje tlaka zmanjša trajanje vzbujenega stanja dušikovih molekul (enačba 3) in posledično povzroči nasičenje inverzne populacije oz. razmerja med spontano in stimulirano

emisijo. V danem eksperimentu pri tlakih nad 100 mbar prične prevladovati spontana namesto stimulirana emisija, kar povzroči hiter padec v moči. Prav tako pri višjem tlaku z dovedeno energijo tvorimo manjšo inverzno populacijo glede na večjo količino prisotnih molekul dušikovega plina.

Graf 3: Graf povprečne moči pulzov laserskega žarka v odvisnosti od tlaka v laserski cevi.



4.6 Električni izkoristek laserja

Za izračun električnega izkoristka laserja sem uporabil meritev povprečne moči pulzov laserskega žarka pri 100 mbar, saj sem pri tem tlaku izmeril najvišjo izstopno obsevanost. Pri 100 mbar povprečna moč laserskega žarka P_i naša 7,1 mW. Meritev vstopne električne moči P_v sem izvedel z merilnikom moči na napajalnem priključku visokonapetostnega napajalnika. Ta meritev zraven izkoristka laserja vključuje tudi izkoristek napajalnika. Na napajalnem priključku visokonapetostnega napajalnika sem ob delovanju laserja izmeril električno moč 36,6 W. Električni izkoristek laserja tako znaša:

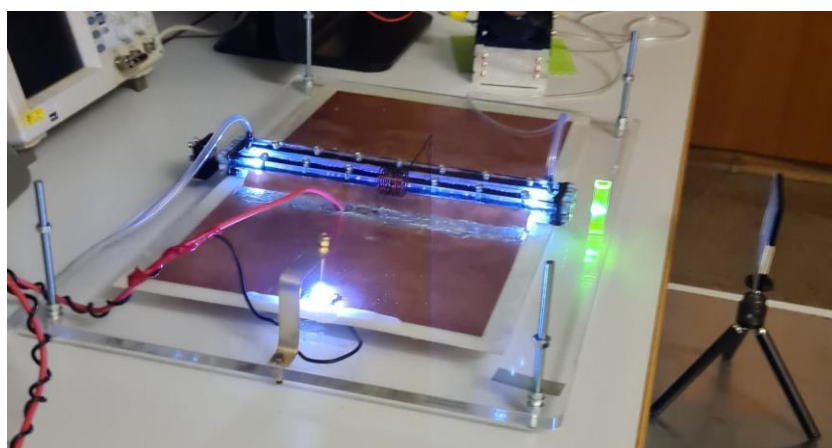
$$\eta = \frac{P_i}{P_v} \cdot 100 \% = \frac{0,0071 \text{ W}}{36,6 \text{ W}} \cdot 100 \% = 0,02 \%. \quad (9)$$

Meritve kažejo nizek električni izkoristek, kar pomeni, da se zelo majhen odstotek električne energije pretvori v fotonsko sevanje. Največ izgub lahko pripišem iskrišču kot visokonapetostnemu stikalu, saj za svoje delovanje ionizira zrak. Prav tako imajo visokonapetostni napajalniki nižji električni izkoristek kot povprečni napajalniki.

4.7 Svetlobno črpanje laserjev na osnovi organskih barvil

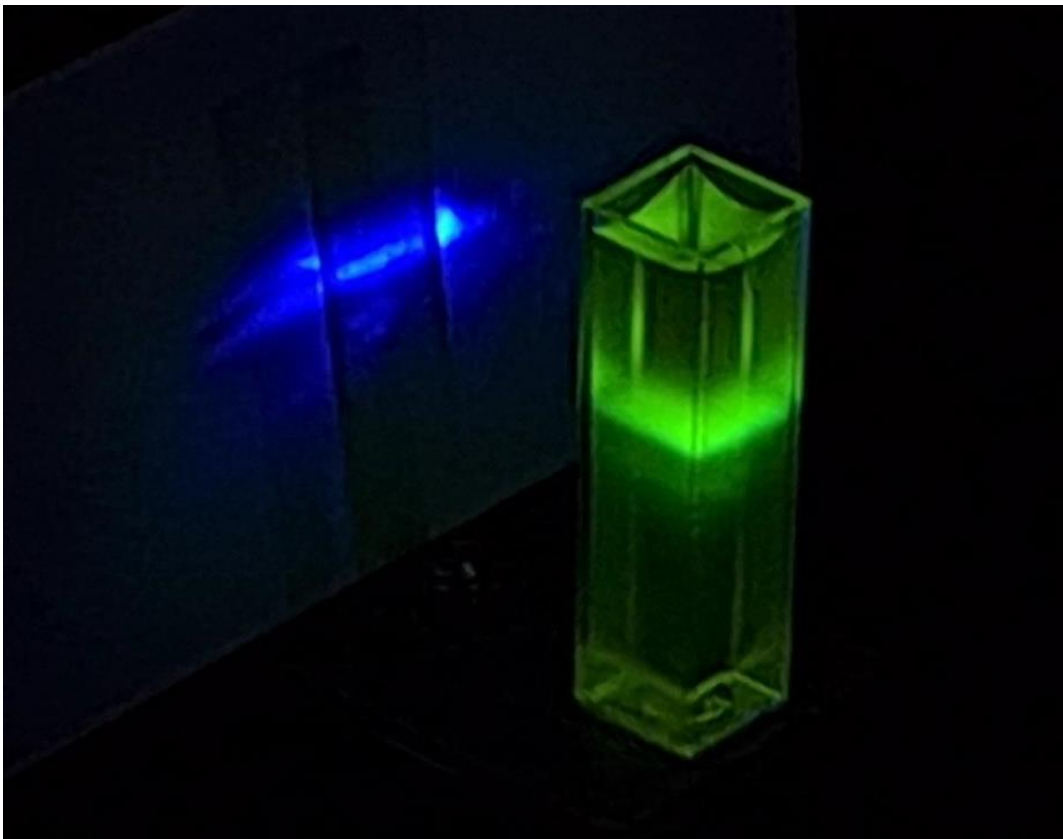
Pri laserjih na osnovi organskih barvil se kot laserski ojačevalni medij uporabljajo raztopljena organska barvila na osnovi ogljika, ki fluorescirajo in jih lahko fotonsko črpamo v širokem območju valovnih dolžin. Velika pasovna širina omogoča njihovo uporabo v nastavljivih in pulznih laserjih. Za doseganje praga črpanja tovrstnega ojačevalnega laserskega medija potrebujemo močen izvor svetlobe kot npr. bliskavica ali zunanji laser.

Ekspiriment svetlobnega črpanja na osnovi organskih barvil sem izvedel tako, da sem laserski žarek usmeril v kiveto, v kateri smo pripravili raztopino organskega barvila. Za kiveto sem na optično os postavil polprosojen papir. Kot organsko barvilo sem uporabil fluorescein, ki sem ga raztopil v destilirani vodi s približno koncentracijo 0,5 g/L. [7] Fluorescein je ena izmed najbolj široko uporabnih fluorescentnih molekul, ki ob vzburjanju z ultravijoličnimi žarki oddaja intenzivno fluorescenco pri valovnih dolžinah v območju od 520 do 530 nm (rumeno zelena barva). Ob vključenem laserju sem opazoval dogajanje.



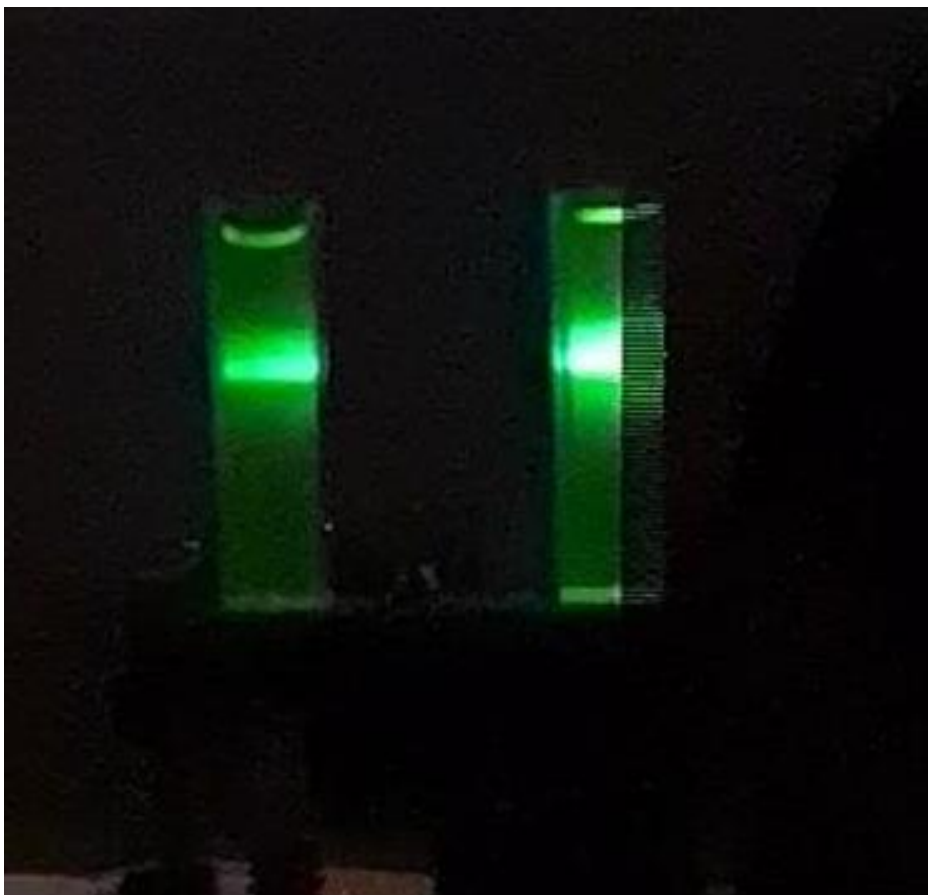
Slika 33: Namestitev eksperimenta laserskega črpanja.

Ob laserskih pulzih je v kiveti zelo dobro razvidna tridimenzionalna oblika laserskega žarka v zelenkasti barvi (slika 33). Prav tako je razvidno, da izstopna svetloba iz kivete ni zelena, temveč ponovno ultravijolična ter iste ploskovne oblike (slika 34). To dokazuje, da se vsi fotoni laserske svetlobe niso absorbirali v organskem mediju oz. je bil presežen prag zmožnosti absorpcije. Od strani kivete (pravokotno na laserski žarek) pa je lepo razviden odziv fotonskega črpanja organskega barvila kot spontane emisije.



Slika 34: Fotonsko črpanje raztopine fluoresceina.

Ekspiriment fotonskega črpanja organskih barvil sem izvedel tudi na kaskadni postavitvi dveh zaporednih kivet z enako raztopino. Iz opazovanja eksperimenta je razvidno, da laserska svetloba stimulira tudi drugo kiveto, kar dodatno potrjuje prejšnje dogajanje. Žal mi ni uspelo posneti ortogonalno ustvarjenega laserskega žarka organskega barvila na papirju.



Slika 35: Kaskadno fotonsko črpanje.

4.8 Laser kot didaktični pripomoček

Seveda je uporaba laserja primerna tudi za didaktične namene, saj je izdelava preprosta in ne potrebuje šolsko nedosegljivih materialov. Med izdelavo in s končnim izdelkom se lahko mnogo naučimo na področju fizike, kemije in elektrotehnike.

Z izdelanim laserjem moramo biti zelo previdni, saj se lahko z nepravilnim ravnanjem poškodujemo. Med delovanjem moramo ohranjati minimalno razdaljo od iskrišča in visokonapetostnih kondenzatorjev ter visokonapetostnih vodov, saj so viri visoke napetosti. Zaradi varnostnih razlogov je potrebno visokonapetostne kondenzatorje po vsaki uporabi laserja razelektriti, saj se naboj v njih ohrani kar nekaj časa.

Na področju elektrotehnike se lahko naučimo spajkanja, tvorbe preprostih vezji, pojmov, kot so prevodnost in izolacija. Spoznamo se z delom ob visoki napetosti in z razumevanjem preprostih elektronskih elementov.

Na področju kemije se lahko naučimo kemijskih lastnosti elementov in molekul ter njihove povezave s področjem fizike.

Na področju fizike se lahko naučimo o odnosih med atomi in svetlobo oziroma fotoni. Seznanimo se z nastankom svetlobe ter s povezavo med energijo in valovno dolžino svetlobe.

Z ustreznim ravnanjem in upoštevanjem varnostnih nasvetov je moj laser primeren tudi za srednješolsko okolje, saj njegova uporaba ni zahtevna.

Pravilna uporaba se izvede s sledečimi koraki.

1. Vključimo vakuumsko črpalko.
2. Odpremo reducirni ventil na dušikovi visokotlačni jeklenki in nastavimo tlak 100 mbar v laserski cevi.
3. Vključimo napajanje toplotnega izmenjevalca za ohlajanje plina.
4. Vključimo visokonapetostni napajalnik za lasersko cev.

5. OVREDNOTENJE HIPOTEZ

Z raziskovalno nalogo sem pokazal, da je iz preprostih sestavnih delov za sorazmerno nizko ceno moč zgraditi sunkovni dušikov laser.

Pri tem sem izdelal dušikov laser na način, da so vidni vsi njegovi sestavni deli kot tudi njegovo osnovno delovanje. Iz tega sledi, da takšen laser lahko služi za didaktične namene.

Z izvedbo eksperimenta obsevanja organskih barvil z ustvarjeno lasersko svetlobo iz dušikovega laserja sem pokazal, da je možno doseči fotonsko črpanje laserjev na osnovi organskih barvil.

Z eksperimentom zakritja zrcala laserske cevi in pripadajočo meritvijo povprečne obsevanosti sem pokazal, da je laserju možno povečati moč izstopne svetlobe z dodatnim zrcalom, ki svetlobo ponovno preusmeri skozi lasersko cev.

6. DRUŽBENA ODGOVORNOST

Laserji in uporaba laserjev pri mladih spodbudi pozornost. Tako lahko s pomočjo laserjev mlade motiviramo za razumevanje pojavov s področja fizike, kemije in elektrotehnike.

Raziskovalna naloga predstavlja način, kako lahko z izgradnjo in raziskovanjem delovanja laserja vpeljemo obravnavo posameznih pojavov v pouk in na sodoben način pridemo do novih znanj in razumevanja delovanja sistemov.

7. ZAKLJUČEK

V sklopu raziskovalne naloge sem izdelal dušikov plinski laser z elektronskim črpanjem. V nalogi sem predstavil tako teoretično ozadje laserja kot tudi njegovo zasnovo in izvedbo. Laser sem tudi eksperimentalno izdelal in preizkusil ter s tem pokazal, da ga je možno izdelati na preprost in cenovno ugoden način. Pri tem sem spoznal splošno delovanje laserjev ter ozadje črpanja laserskega medija in stimulirane emisije svetlobe. Spoznal sem se z odvisnostmi med energijo in valovno dolžino svetlobe, metodo ojačenja svetlobe s stimulirano emisijo ter metodami ustvarjanja inverzne populacije v laserskem mediju. Pri eksperimentiranju z izdelanim laserjem sem se spoznal s fotonskim črpanjem organskih barvil ter učinkom fluorescence in s tem ponazoril metodo laserske spektroskopije. Žal mi pri eksperimentu laserja s fotonskim črpanjem ni uspelo posneti pravokotno na vstopni laserski žarek ustvarjenega laserskega odziva.

Prav tako sem se seznanil z delovanjem preprostih elektronskih vezij in komponent ter uporabo merilnih inštrumentov s področja elektrotehnike. Največ težav mi je povzročalo iskrišče, saj so mi prvi zagoni laserja povzročali nenadzorovane preboje med pozitivnim in negativnim polom visoke napetosti. Ob tem sem imel težave z zagotavljanjem podtlaka in merjenjem izhodne moči pulzov laserskega žarka. Ker gre za časovno kratke impulze laserske svetlobe, nisem uspel izmeriti posameznih laserskih pulzov, temveč zgolj povprečno obsevanost, iz katere sem izračunal povprečno moč. Imel sem tudi težavo z zajemanjem slik, saj so dogodki povezani s tem laserjem zelo kratkotrajni.

V prihodnje bi samo zasnovu in izvedbo laserja spremenil v longitudinalno obliko z uporabo komercialno dobavljivih visokonapetostnih kondenzatorjev, steklenih ter kovinskih cevi in stabilnejšega iskrišča. Na ta način bi dosegel bolj stabilno delovanje celotnega laserja z manjšim presekom izstopnega žarka in manjšim kotom širjenja. S to obliko laserja bi prav tako lahko izboljšal poravnano optične poti in zrcal.

8. LITERATURA IN VIRI

8.1 Pisni viri

1. WESCHLER, Matthew. How lasers work. [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <<https://science.howstuffworks.com/laser.htm>>.
2. Nitrogen laser. Wikipedija: prosta enciklopedija [online]. [13.12.2020]. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nitrogen_laser>.
3. Neodim laser. Wikipedija: prosta enciklopedija [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Nd:YAG_laser>.
4. Maser. Wikipedija: prosta enciklopedija [online]. [6.1.2021]. Dostopno na: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Maser>>.
5. Gas laser. Wikipedija: prosta enciklopedija [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_laser>.
6. Dye Laser DIY. Physics Open Lab. [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <<http://physicsopenlab.org/2020/07/17/dye-laser-diy/>>.
7. DIY Nitrogen TEA Laser. Physics Open Lab. [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <<http://physicsopenlab.org/2020/07/16/diy-nitrogen-tea-laser/>>.
8. KRAMBERGER, Iztok in REICH, Tomaž. (1992). *Laser in njegova uporaba*. Maribor. COBISS.SI-ID – 2156808

9. MOHORIČ, Aleš. *Fizika 3*. Ljubljana. Mladinska knjiga. 2020. ISBN 978-961-01-5539-3.
COBISS.SI-ID – 14157315

10. CSELE, Mark. *Homebuilt Lasers Page*. [online]. [10.11.2020]. Dostopno na: <
<http://technology.niagarac.on.ca/people/mcsele/lasers/index.html>>.