



RAZISKOVALNA NALOGA

VPLIV LASERSKEGA ŽARKA NA MATERIALE

MENTOR: Zdenka Petelinšek, prof.

AVTOR: Tonja Kojterer, 3.a

ZAHVALA

Izvedba te raziskovalne naloge v prvi vrsti ne bi bila mogoča, brez uporabe laserja, ki sta mi ga mama in oče z veseljem odstopila za izvedbo raziskovalnega dela. Dobljeni rezultati so pokazali, da je za učinkovit razrez 10mm debelega pleksi stekla, dovolj že moč 30%. Ta podatek jima bo koristil v nadalje, saj bosta laser za enake rezultate uporabljala pri manjši moči ter tako samemu laserju podaljšala življenjsko dobo.

Zahvaljujem se jima tudi za vso tehnično pomoč, pri raziskovalnem delu pri uporabi laserja. Velika zahvala gre tudi profesoricam, ga. Aniti Pihlar in ga. Tanji Ocvirk za pomoč pri oblikovanju raziskovalne naloge. Za končni izdelek pa je najbolj zaslužna mentorica ga. Zdenka Petelinšek, ki je ogromno pripomogla pri izvedbi raziskovalne naloge, kot tudi pri korekciji. Brez njene pomoči, najverjetneje raziskovalna naloga ne bi bila dokončna in tako dodelana.

Vsebina

Kazalo slik	5
Kazalo grafov in tabel	5
1 POVZETEK	7
1.1 SUMMARY	7
2 UVOD:	8
2.1 namen in cilji	8
2.2 hipoteze	8
3. TEORETIČNE OSNOVE	9
3.1 LASERSKI ŽARKI	10
3.1.1 Osnove	10
3.1.1.2 Delovanje laserja	11
3.2 LASERSKI ŽARKI OKOLI NAS	12
3.2.1 Gradbeništvo	12
3.2.1.2 Virtualna tehnologija	13
3.2.1.3 Vojne	13
3.2.1.4 Vsakdanje življenje	13
3.2.1.5 Umetnost	14
3.2.1.6 Sežiganje materiala	15
3.3 VRSTE LASERJEV	15
3.3.1 Razlike med posameznimi vrstami laserjev	15
3.3.1.2 rubinski laser	15
3.3.1.3 He-Ne laser	16
3.3.1.4 polprevodniški injekcijski laser	16
3.3.1.5 CO₂ laser	17
3.3.1.6 Uporaba posameznega laserja	17
3.4 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV	17
3.4.1 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV V MEDICINI	17
3.4.1.1 Uporaba laserja pri operacijah	17
3.4.2 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV V PREHRAMBENI INDUSTRiji	18
3.4.2.1 Naprave z uporabo laserskih žarkov v prihodnosti	18
3.4.2.1.2 Hrana obdelana z laserjem	19
3.5 MOČ LASERJEV	20
3.5.1 Osnove	20
3.5.1.2 Moči posameznih laserjev	20
3.5.1.3 Kakšne debeline materialov lahko režejo?	21
3.5.1.4 Katero materiale laserji najlažje režejo?	21

3.5.1.5 Za razrez katerih materialov porabi laser največ časa?	21
4 RAZISKOVALNO DELO	21
5 POTRDITEV HIPOTEZ.....	38
6 ZAKLJUČEK.....	38
7 SEZNAM LITERATURE:	39
7.1 VIRI SLIK:.....	40

Kazalo slik

Slika 1: prehodi med različnimi stanji atomov.....	10
Slika 2: štirinivojski laser	11
Slika 3: sestava laserja.....	12
Slika 4: laserski daljinomer	13
Slika 5: graviranje	14
Slika 6: graviranje	14
Slika 7: potek atomov skozi pasove laserja.....	15
Slika 8: shema polprevodniškega laserja.....	16
Slika 9: laserska operacija oči	18
Slika 10: graviranje na limono	19
Slika 11: graviranje v meso	19
Slika 12: šparglji obdelani z laserjem.....	20
Slika 13: ime in model laserja	21
Slika 14: CO ₂ laser uporabljen za raziskave	22
Slika 15: laserski žarek v tubi.....	22
Slika 16: tuba brez laserskega žarka	23
Slika 17: mehanizem za premikanje glave po delovni površini laserja.....	23
Slika 18: glava laserja.....	24
Slika 19: posnetek zaslona oblikovanja v programu CorelDRAW	24
Slika 20: posnetek zaslona programa za laser	25
Slika 21: primerjava reza pri isti moči in hitrosti na drugi poziciji delovne površine.....	25
Slika 22: primerjava reza pri isti moči in hitrosti na drugi poziciji delovne površine.....	26
Slika 23: rezi na plexi steklu pri moči 10%.....	27
Slika 24: rezi na plexi steklu pri moči 20%.....	27
Slika 25: rezi na plexi steklu pri moči 30%.....	29
Slika 26: rezi na plexi steklu pri moči 40%.....	30
Slika 27: rezi na plexi steklu pri moči 80%.....	31
Slika 28: graviranje na plexi steko	34
Slika 29: gravura - moč 80%, hitrost - 200mm/sec	34
Slika 30: gravura - moč 30%, hitrost 600mm/sec	35
Slika 31: graviranje na les	35
Slika 32: rezanje v plexi steklo.....	36
Slika 33: laser med delom	36
Slika 34: laser med delom	37
Slika 35: sled laserskega žarka	37

Kazalo grafov in tabel

Tabela 1: moč laserja 10%	26
Tabela 2: graf - moč 10%	26
Tabela 3: moč laserja 20%	27
Tabela 4: graf - moč 20%	28
Tabela 5: moč laserja 30%	28
Tabela 6: graf - moč 30%	28
Tabela 7: moč laserja 40%	29
Tabela 8: graf - moč 40%	29
Tabela 9: moč laserja 80%	30
Tabela 10: graf - moč 80%	31

Tabela 11: tabela in graf za hitrost 5mm/s	32
Tabela 12: tabela in graf za hitrost 10mm/s	32
Tabela 13: : tabela in graf za hitrost 20mm/s	32
Tabela 14:: tabela in graf za hitrost 30mm/s	33

1 POVZETEK

V raziskovalni nalogi sem najprej teoretično predstavila laserje, njihovo delovanje, vrste laserjev ter njihovo uporabnost. V eksperimentalnem delu pa sem s pomočjo CO₂ laserja potrdila oziroma ovrgla hipoteze, ki sem si jih zastavila. Pri delu bom uporabila pleksi steklo ter les, ki jih najpogosteje uporabljam pri delu. Za to raziskovalno nalogo sem se odločila, da ugotovim, pod kakšnimi pogoji pridemo hitro, varčno in kvalitetno do naročenega izdelka. Pri laserju lahko nastaviš moč delovanja in hitrost premikanja laserske glave. Življenska doba laserja je zelo odvisna s kakšno močjo laser deluje. Ker je potrebno material rezati s čim manjšo močjo se mi je zdelo smiselno, da to preučim in ugotovim na kolikšno moč in hitrost delovanja laserja je smiselno nastaviti, da bo deloval optimalno. V sami proizvodnji morajo tudi gravirati na material, zato sem preučila tudi, kako pa v tem primeru nastaviti delovanje laserja, da je rezultat optimalen.

1.1 SUMMARY

In the research project, I first theoretically presented lasers, their operation, types of lasers and their applicability. With the help of a CO₂ laser in the experimental part, I confirmed or refuted the hypotheses I had set. I will use plexiglass and wood, which are most often used at work. For this research project, I decided to find out under what conditions we get to the ordered product quickly, economically and with quality. On the laser, you can adjust the operating power and speed of the laser head. The lifespan of a laser is highly dependent on the power with which the laser is used. Since it is necessary to cut the material with as little power as possible, I thought it would make sense to study this and determine how much power and speed of the laser it makes sense to set to work optimally. In the production itself, they also have to engrave on the material, so I also studied how to adjust the operation of the laser in this case, so that the result is optimal.

2 UVOD:

V tej raziskovalni nalogi boste izvedeli nekaj več o laserskih žarkih in v katerih področjih se uporablja najpogosteje. Ozek laserski žarek dosega takšne moči, da lahko razreže zelo trdne materiale kot so razne kovine, les, pleksi steklo ter tudi mehkejše materiale kot na primer pena, usnje, umetno usnje. Poznamo več različnih vrst laserjev, ki delujejo s pomočjo različnih plinov. Jaz sem za svoje raziskave uporabljal CO₂ laser, ki pa je zmožen rezati les, pleksi steklo, peno, usnje ter umetno usnje. Laserje ne uporablja samo v industriji, temveč tudi v gradbeništvu, holografiji, umetnosti in predvsem v zdravstvu, pri raznih operacijah, saj je laserski žarek zelo natančen.

Za to temo sem se odločila, ker se mi zdi zanimivo kako lahko tako majhen snop svetlobnih žarkov razreže še tako trdne materiale. Ker imam CO₂ laser v bližini doma in me tako praktično sprembla vsak dan, sem se odločila da ga bolje preučim in ugotovim kako različne moči in hitrosti laserskega žarka vplivajo na globino reza oziroma in na graviranje.

2.1 namen in cilji

Namen te raziskovalne naloge je, da čim bolj učinkovito in razumljivo predstavim delovanje, moč, nevarnosti, uporabo laserjev v vsakdanjem življenju in naprave, ki delujejo s pomočjo laserske svetlobe.

Cilj naloge je ugotoviti kako moč in hitrost vplivata na razrez materialov. Pri kateri moči in hitrosti je graviranje najučinkovitejše.

2.2 hipoteze

1. Moč laserja vpliva na udorno globino reza.
2. Hitrost delovanja laserja vpliva na udorno globino reza.
3. Pri graviranju sta hitrost in moč nepomembna.
4. Lega postavitve objekta na delovno površino laserja nima vpliva na globino reza.

3. TEORETIČNE OSNOVE

Pri teoriji sem opisala:

3.1 laserski žarki

- Osnove
- Delovanje laserja

3.2 Laserski žarki okoli nas

- Kje vse lahko srečamo laserske žarke
- Izdelki, izdelani z laserjem
- Sežiganje materiala

3.1.1.1 Vrste laserjev

- Razlike med posameznimi vrstami laserjev
- Uporaba posameznega laserja

3.1.2 uporaba laserskih žarkov

3. 1.2.1 uporaba laserskih žarkov v medicini

- Uporaba laserja pri operacijah

3.1.2.2 uporaba laserskih žarkov v prehrambeni industriji

- Naprave z uporabo laserja v prihodnosti
- Hrana obdelana z laserjem

3.1.3 Moč laserja

- Osnove
- Moči posameznih laserjev
- Kakšne debeline materialov lahko režejo?
- Katere materiale laserski žarki najlažje režejo?
- Za razrez katerih materialov porabijo največ časa?

3.1 LASERSKI ŽARKI

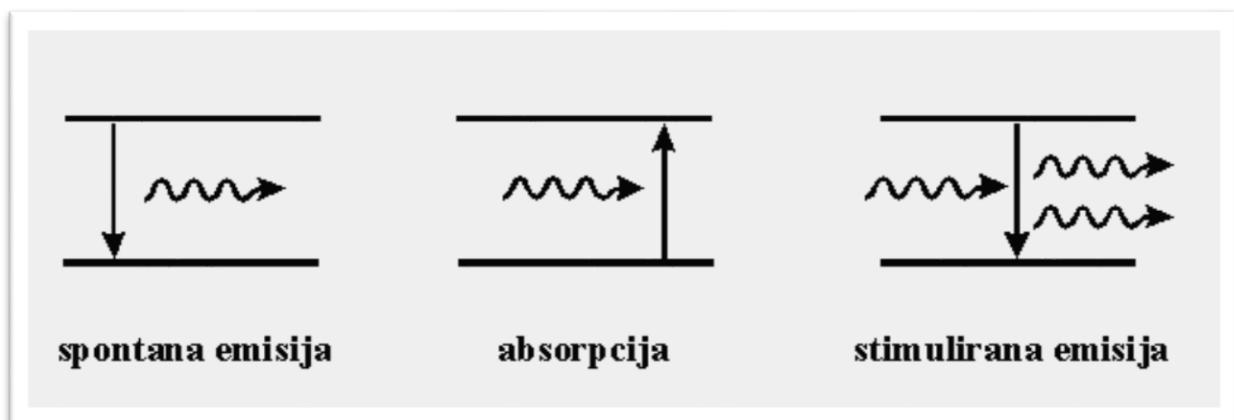
3.1.1 Osnove

Začetki laserskih žarkov segajo v čas enega največjih fizikov Alberta Einsteina, ki je zasnoval nujen pogoj za stimulirano emisijo, ki jo bomo podrobneje spoznali kasneje. Leta 1954 so Charles H. Townes iz Združenih držav Amerike ter Nikolay Gennadiyevich Basov in Alexander Mikhailovich Prokhorov iz Rusije, izumili in predstavili prvo napravo, ki je opravljala mikrovalovno sevanje in se je imenovala Maser. Sodelavca Townes in Schawlow sta nadaljevala svoj posel in ustvarila pogoje za vidno lasersko svetlobo. Leta 1960 so predstavili pravi laser, kateri je za svoje delovanje porabljal rubinov kristal in oddajal kratke bliske rdeče svetlobe.

Laserji se med seboj razlikujejo tudi po valovnih dolžinah. Valovne dolžine nekaterih laserjev so:

- Helijsko-neonski laser: 632.8 nm
- Ogljikov-oksidni laser: 10.600 nm
- Dušikov laser: 337.1 nm
- Argonov laser: 454.6 nm

Laser je eden od virov svetlobe, ki se pojavlja v obliki ozkega, enobarvnega žarka. Ta svetloba se imenuje koherentna svetloba, za katero je značilno valovanje z enako frekvenco in enako polarizacijo, kjer velja, da je fazna razlika med izbranimi valovanjema konstanta. Okrajšava za laser je **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** in pomeni ojačevanje svetlobe s stimulirano emisijo sevanja.



Slika 1: prehodi med različnimi stanji atomov

Na sliki 1 vidimo pojave pri prehodih med različnimi stanji atomov. Elektrone najdemo v različnih elektronskih ovojih. Med temi ovoji lahko prehajajo na tri načine:

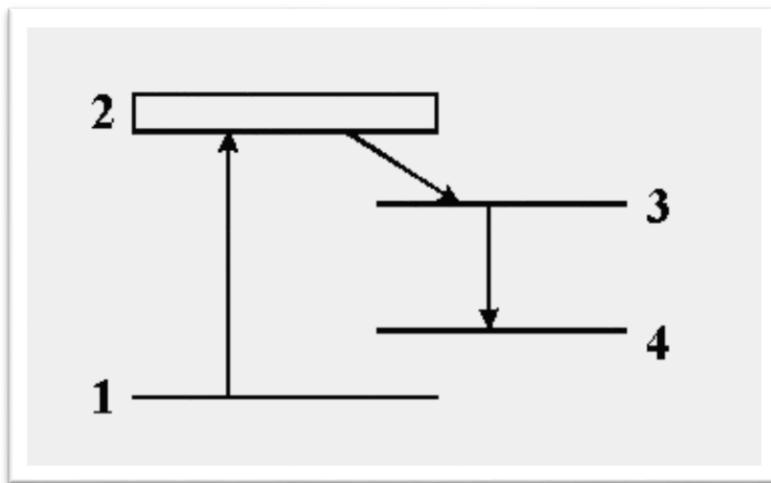
- Spontana emisija (slika 1 levo). Deluje tako, da atom samodejno preide v nižje energijsko stanje in tako odda foton, ki je osnovni delec elektromagnetnega valovanja.
- Absorpcija (slika 1 sredina). V tem postopku atom preide v višje energijsko stanje, zato absorbira foton.

- Stimulirana emisija (slika 1 desno). Najpomembnejša za razumevanje in delovanje laserjev. Foton povzroči, da atom preide v nižje energijsko stanje in odda dodaten foton.

Pri spontani emisiji, absorpciji in stimulirani emisiji, lahko sodelujejo le fotoni z določenimi frekvencami ali valovnimi dolžinami.

3.1.1.2 Delovanje laserja

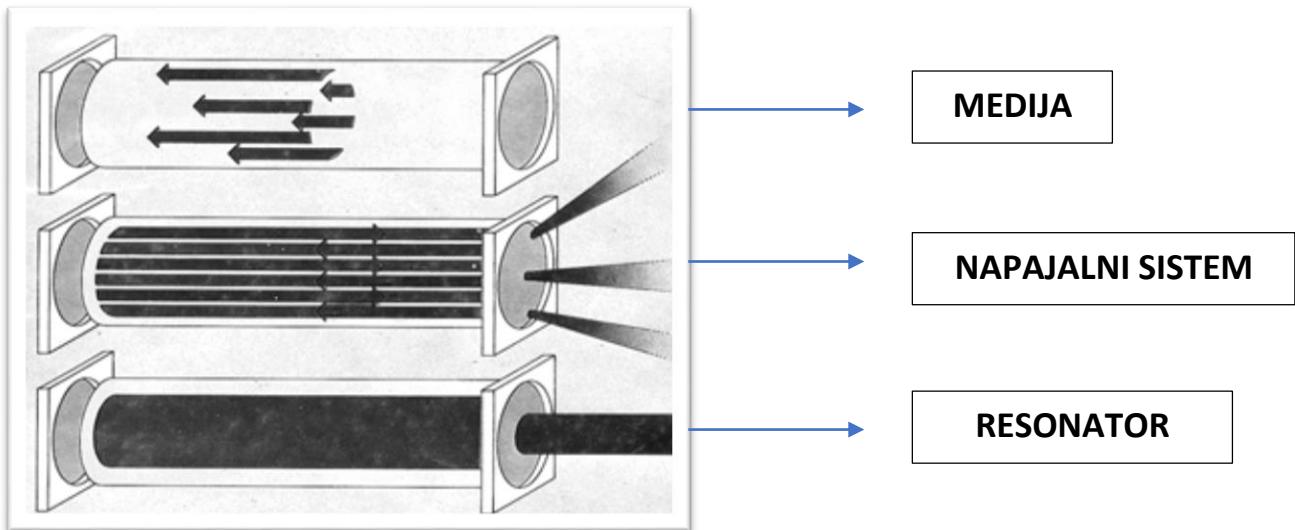
Delovanje je v nadaljevanju predstavljeno s shemo štiri-nivojskega laserja, kot ga prikazuje slika.



Slika 2: štirinivojski laser

Atome spodbudimo z enim od načinom, na primer z bliskavico, da se dvignejo na višji nivo in tako zapustijo osnovno stanje, ki je na sliki prikazano s številko 1. Pri tem napolnijo pomožni nivo, označen s številko 2. Laser lahko ima tudi več pomožnih nivojev. Atomi s pomočjo spontane emisije prehajajo od nivoja 2 na nivo 3, nato še na nivo 4. V primeru, da nivoja 3 in 4 sovpadata dobimo tako imenovan tri-nivojski laser.

Navadno je laser sestavljen iz treh delov: medija, ki generira svetlobo, napajalnega sistema, zaslužnega za spodbujanje atomov, ki mu sledi sevanje iz resonatorja, kateri curek natančno usmeri.



Slika 3: sestava laserja

Pri emisiji atomi sevajo po celotnem prostoru, zato je potrebno z optiko to svetlobo zbrati le na ozek vendar močan curek svetlobe. To lahko dosežemo, če damo sevajoči medij v cev, ki jo z obeh strani zapremo z zrcalom kot prikazuje slika. Če pride do stimulirane emisije, pride do odboja in ponovne stimulirane emisije. V kolikor pa sevanje ne poteka na osi pa sevanje zapusti laserski medij. Tako bi dobili ojačanje samo v eni smeri in se žarek ne bi dovolj ojačal v cevi. Lahko se le del svetlobe prepusti skozi eno zrcalo ali celo obe, to se lahko zgodi skozi kakšno odprtino ali pa skozi polprepustno zrcalo. Svetloba, ki izstopi iz cevi, je laserski curek.

Torej, laser pošilja iz resonatorja žarek intenzivne svetlobe skozi sistem leč in zrcal na rezalno glavo, kjer se usmeri in zoži v zelo tanek, koncentriran žarek. Ta žarek se usmeri navzdol na material, ki ga želimo razrezati ali gravirati.

Rezalna glava je nameščena v tako imenovani portal XY os. Premikanje glave omogoča mehanski sistem, ki ga poganja trak ali pa veriga, kar omogoča natančno premikanje glave po delovni površini laserja.

3.2 LASERSKI ŽARKI OKOLI NAS

Dan danes že lahko lasersko svetlobo srečamo skoraj na vsakem koraku. Najbolj uporabna je še vedno v industriji, kjer uporabljam najmočnejše laserje, kar jih poznamo. Zanimivo je, da najmočnejši laserji proizvedejo le nekaj več energije kot običajna grelna plošča za kuhanje, le da je vsa energija zbrana v enem samem ozkem curku laserske svetlobe. Tolikšna koncentracija energije v tako majhni točki pa zadošča, za sežiganje kovin do temperature pri kateri v trenutku izparijo.

3.2.1 Gradbeništvo

Laserje najdemo tudi v gradbeništvu, kjer se uporabljam predvsem za geodezijo. To je veda o merjenju in določitvi dimenzijs Zemlje kot celote ali posameznega dela. Ker so laserji zelo ravni, se uporabljam za zelo natančna in precizna merjenja, kot je določanje lege objektov. Majhni prenosni laserji so zato primerni za vodenje in nadzorovanje gradnje tudi pri velikih projektih,

kot so mostovi in predori. Z lasersko svetlobo lahko prav tako preverjamo spremembe objektov na primer ugrezanje po njegovi izgradnji.



Slika 4: laserski daljinomer

Na sliki 4 vidimo daljinomer, ki ga uporabljajo geodeti. S pomočjo laserske svetlobe lahko merijo tudi do 100 m z natančnostjo 0.01 mm.

3.2.1.2 Virtualna tehnologija

Tudi v virtualni tehnologiji najdemo lasersko svetlobo. Uporabljajo se v tako imenovanih laserskih šovih, kjer publiko privabijo z različnimi barvnimi efekti. S holografijo pa se je razvila tudi možnost za 3D televizije, virtualne predmete in namišljeno scenografijo.

3.2.1.3 Vojne

Laserji služijo tudi za slabe namene. V vojnah so jih uporabljali za hitro določanje razdalj z laserskimi daljinomeri. Podoben sistem kot merjenje razdalj med Zemljo in Luno uporabljajo tudi bojna letala za avtomatsko višinsko merjenje. Ta svetloba tudi raketam olajša delo, saj zazna razpršene žarke, ki se odbijejo od označenega cilja. Na srečo pa je uporaba laserja kot samostojno orožje še samo znanstvena fantastika in jo lahko vidimo le v filmu kot je Vojna zvezd.

3.2.1.4 Vsakdanje življenje

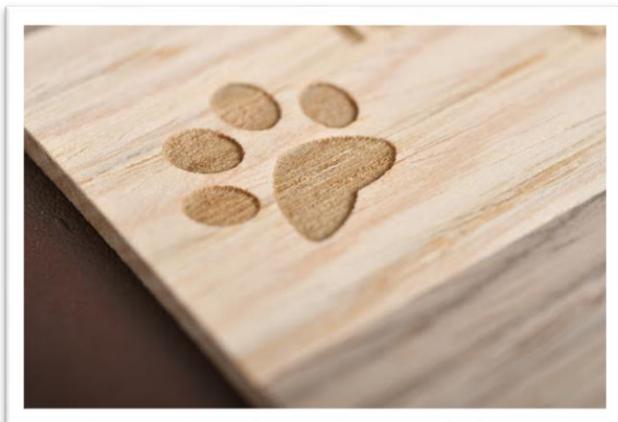
V vsakdanjem življenju laserje najdemo tudi v bolj preprostih napravah, kot so laserski kazalniki za razne predstavitve, nekateri skenerji kod v trgovinah, majhna laserska svetilka v našem namiznem predalu, v športu za natančno merjenje časa, policisti jih uporabljajo tudi za merjenje prekomerne hitrosti vozil.

Kot zanimivost, so zmožni vrtati luknje v ene od najtrdnejših materialov, diamante. Njegovo uporabo v medici za bolj občutljive operacije bomo podrobneje spoznali proti koncu raziskovalne naloge. Učinkovito uporabo laserja pričakujemo v prihodnosti predvsem za

tridimenzionalne holografije in prav tako v izkoriščanju skoraj neizčrpanega vira energije, kot je zlivanje luhkih atomskih jeder.

3.2.1.5 Umetnost

Doma imamo veliko izdelkov, ki so bili izdelani s pomočjo laserja. Večina obeskov, na primer obeski za ključe so izrezani z laserjem. Laserji pa niso sposobni samo izrezovati temveč tudi gravirati, kar pomeni, da lahko na različne materiale s pomočjo sežiganja izdelamo kakršnokoli sliko, ki se od podlage po navadi loči po bolj temnejši barvi. Primer graviranja lahko vidite na slikah 5 in 6.



Slika 5: graviranje



Slika 6: graviranje

Poleg graviranja slik so z laserjem gravirani v večini izdelani tudi usnjena jakna, čevlji ali denarnica. Prav tako lahko na usnje graviramo, to pa nam da 3D učinek. Prav tako se izdelovalci nekaterih novejših glasbenih inštrumentov poslužujejo laserja za izdelavo instrumenta. To so lahko kitare, violine, violončela pa tudi posamezni deli klavirja. Veliko okvirjev za očala, še posebej lesenih je izdelano na tak način.

3.2.1.6 Sežiganje materiala

Laserji delujejo s pomočjo sežiganja tankega pasu materiala. Sežiganje materiala se nadzoruje in prilagaja z močjo laserskega žarka in hitrostjo premikanja laserske glave glede na potrebo in material. Večjo moč seveda potrebujejo za izrez, kot pa za graviranje. Lažje izrezujejo materiale, kot so les, plastika in usnje, posebni laserji pa lahko režejo tudi kovine. Zato poznamo več različnih vrst laserjev, ki so namenjeni izbranim materialom in so prilagojeni le tem. Seveda pa je čas sežiganja odvisen tudi od debeline materiala.

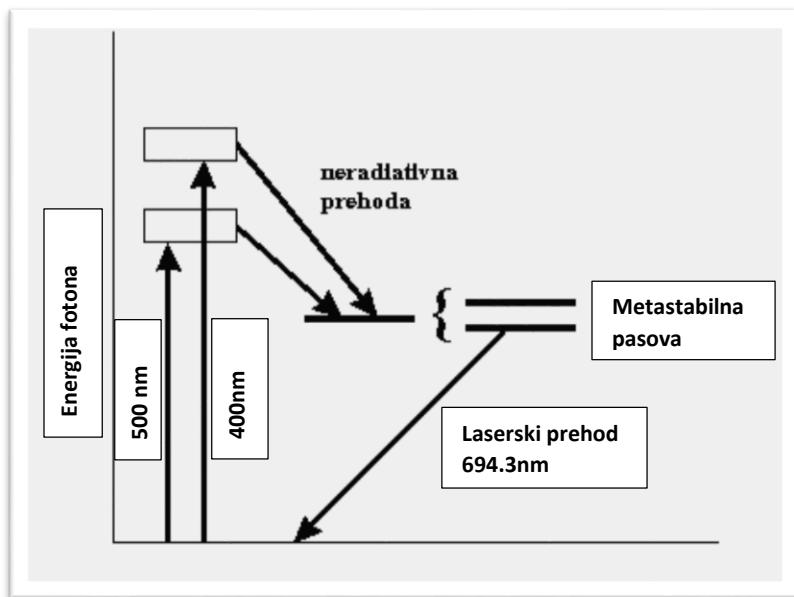
3.3 VRSTE LASERJEV

3.3.1 Razlike med posameznimi vrstami laserjev

Poznamo več vrst laserjev, ki se ločijo po zmožnosti v moči in po materialu katerega lahko sežigajo.

3.3.1.2 rubinski laser

Rubinski laser je primer tri-nivojskega laserja s trdim jedrom, za katerega uporablja paličico iz rubina. Rubin je z drugimi besedami aluminijev oksid, kateremu so dodani atomi kroma. Ti atomi kroma so aktivno sredstvo v rubinovem laserju. Paličica rubina je obdana s ksenonovo bliskavico, iz osnovnega nivoja spodbujajo atome v enega od dveh razpoložljivih energijskih pasov z valovno dolžino okoli 400nm (vijolična svetloba) ali 550nm (zelena svetloba), ki jo kristal močno absorbira. To vzbujanje z absorpcijo imenujemo optično črpanje. Iz širokih energijskih pasov prehajajo atomi v par metastabilnih pasov, od tam dobimo s stimulirano emisijo svetlobo z valovno dolžino 694.3 nm. Na sliki lahko tudi vidimo potek atomov skozi pasove.



Slika 7: potek atomov skozi pasove laserja

Rubinski laserji so v preteklosti imeli posrebrena osnovna dela rubinske paličice, danes pa imajo ti laserji dva zrcala katera eno svetlobo popolnoma odbijeta, drugo pa delno spustita

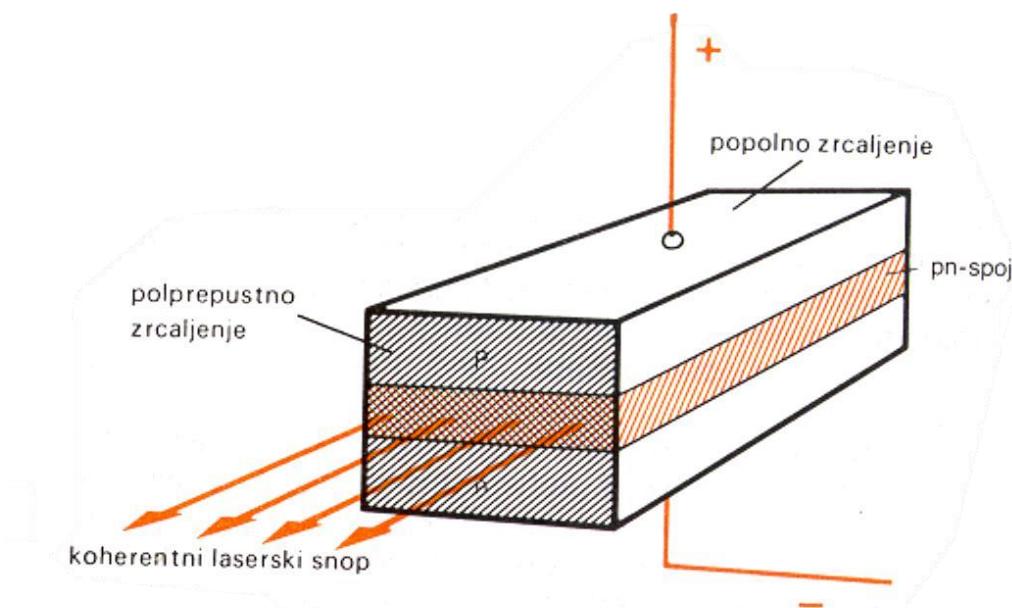
skozi. Rubin je aluminijev oksid (Al_2O_3) s primesjo kroma. Rubinska paličica je ob prisotnosti kroma rožnato-rdeče barve, dolga je 20 cm in ima premer od 3 do 25 mm. S stimulirano emisijo dobimo svetlobo valovne dolžine 694,3 nm.

3.3.1.3 He-Ne laser

Drugi laser, ki ga poznamo se imenuje helijsko-neonski laser. Kot je že iz imena razvidno je v tem laserju aktivno sredstvo helij in neon, ki sta pri tlaku približno 1 mbar. Vendar pa količini helija in neona nista enaki, helija je kar za pet do deset krat več kot neona. Mešanica teh plinov je zaprta v cevki, zraven pa sta še dva zrcala na razdalji celotnemu večkratniku polovične valovne dolžine svetlobe, ki jo seva laser. Z električnim poljem pospešimo gibanje elektronov in tako povečamo število trkov med njimi. Atomi helija tako pridejo v vzbujeno stanje. Ko atom helija trči v atom neon, jim ti predajo večino energije. Iz metastabilnega stanja preidejo atomi neon v stanje stimulirane emisije, pri čemer oddajo foton z valovno dolžino 632,8 nm. Helijsko-neonski laser se od rubinskega laserja loči tudi po tem, da je ta štiri-nivojski in deluje zvezno.

3.3.1.4 polprevodniški injekcijski laser

Polprevodniški injekcijski laser je posebna vrsta trdnega laserja. Osnova tega laserja je, da se pri določenih pogojih pojavijo v mejni plasti določeni prehodi, oddajajo koherentno svetlobno delovanje. Efekt laserskih žarkov pa je odvisen od toka, ki teče skozi mejne plasti. Ta efekt pa je najučinkovitejši pri mešanih kristalih 3. in 5. skupine periodnega sistema elementov, kot so: Ga, As, In, Sb. Efekt nastane v mejni plasti med dvema kristaloma, ki morata imeti različno prevodnost. V enem delu za to skrbijo elektroni, v drugem delu je za ta efekt posledica pomanjkanja elektronov. Ta mesta z manjkajočimi elektroni imenujemo vrzeli, pri prevajanju električnega toka pa govorimo o prevajanju z vrzelmi. Mejno ploskev med deloma z elektroni imenujemo pn-spoj, ki jo lahko lepo vidimo tudi na shemi.



Slika 8: shema polprevodniškega laserja

3.3.1.5 CO₂ laser

CO₂ laser je laser, ki sem ga uporabljala za svoje raziskave. Za svoje delovanje porablja zmes plina ogljikovega dioksida, kateremu so dodani helij, vodik, dušik, vodna para in ksenon. Zaradi njegove zmožnosti dolžine valovanja, ki znaša 10.600 nm, je ta primeren za sežiganje materialov kot je les, akrilno steklo, steklo, papir, tekstil, plastiko, folije in usnje. CO₂ laser dosega moči od nekaj mW do MW. V sunkovnem načinu pa lahko dosegajo tudi moči do nekaj deset GW. CO₂ laserji nudijo zelo natančne izreze zaradi zelo dobre kakovosti laserskega žarka. CO₂ laser je med najbolj uporabljenimi laserji in je zato tudi najbolj prodajan.

CO₂ laserje delimo tudi glede na želene moči. To so laserji z zaprto cevjo, ki dosegajo moči do nekaj sto vatov. Drugi so difuzijsko hlajeni laserji, ki imajo moči nekaj kW. Tretji so laserji s hitrim aksialnim in transverzalnim tokom plina. Tukaj se plinska mešanica pretaka skozi cev in hladilni sistem ter tako omogoča in skrbi za ustrezeno hlajenje laserja. Zadnji so še TEA laserji (*transverse excited atmosphere laser*), kateri delujejo pod večjim tlakom, elektrode so nameščene prečno glede na lasersko cev. Delujejo z močmi do več deset kilovatov.

3.3.1.6 Uporaba posameznega laserja

CO₂ laser ima krajšo valovno dolžino, zato se uporablja za razrez tanjših in manj trdnih materialov. To so: les, papir, navadno in akrilno steklo, tekstil, usnje in plastiko. Močnejši laserji, kateri za svoje delovanje porabijo tudi več energije pa lahko sežigajo tudi trdnejše materiale in materiale večjih debelin. Torej rubinski in injekcijski laser lahko sežigata materiale kot so: jeklo, aluminij, inox, pa tudi trdnejše plastike in pobarvane kovine.

3.4 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV

3.4.1 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV V MEDICINI

3.4.1.1 Uporaba laserja pri operacijah

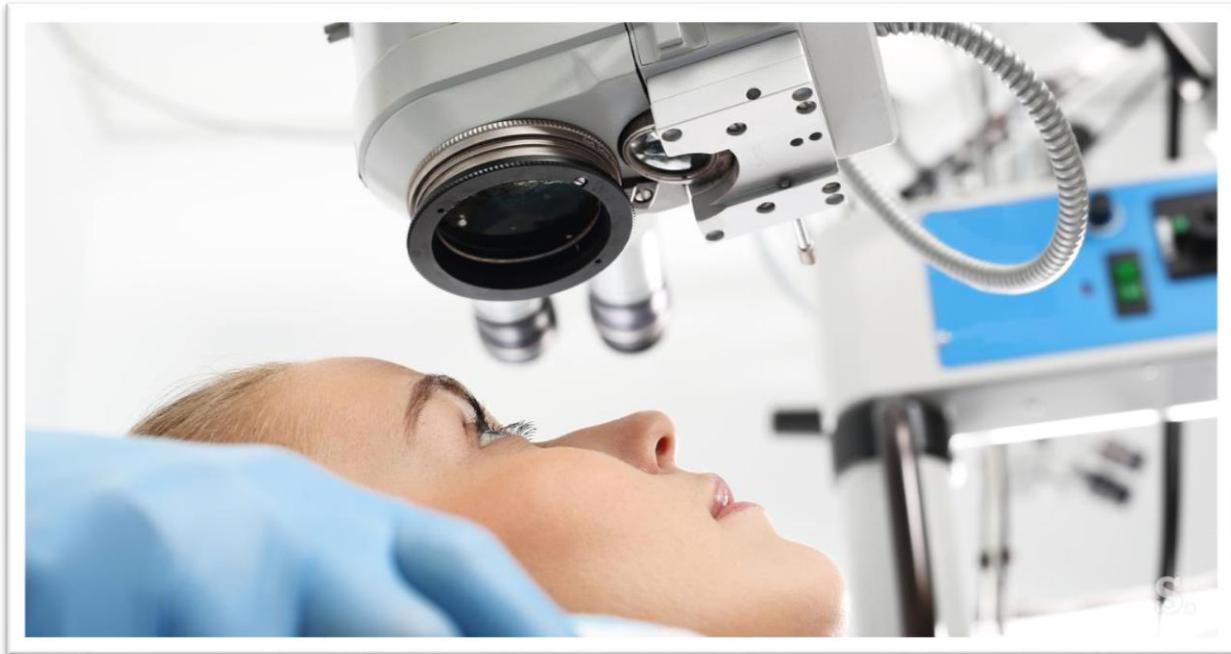
Laserje uporabljajo tudi pri različnih operacijah. Ti omogočajo operacijo, brez stika kirurga in nekatere so nadzorovane izključno samo preko računalnika.

Laserska operacija dioptrije je postopek, pri katerem trajno odpravijo dioptrijo. Očesna laserska operacija lahko odpravi kratkovidnost, daljnovidnost, astigmatizem in tudi starostno daljnovidnost. Z to operacijo spremenijo površino in debelino roženice. Laser roženico trajno preoblikuje, zato pa se uporablja različne metode. Najmodernejša je trenutno ReLEx SMILE, ki ga izvajajo na vrhunskem Femtu laserju – Visumax. To je kratkotrajen in brez bolečinski poseg, izboljšanje vida pa je vidno že po 2 dneh. Za očesno operacijo s tem laserjem je potreben laserski rez samo do 2mm, v primerjavi z operacijami, pri katerih so potrebni tudi so 20mm rezi v oko.

Druga metoda se imenuje PRK in je najstarejša metoda laserskih operacij. Pri tej operaciji z Excimer laserjem le površinsko preoblikuje roženico. Pri tem pa je tudi nekaj slabosti, kot počasno pridobivanjem ostrine vida, neprijetna pekoča bolečina in dolgotrajno celjenje roženice.

Tretja metoda je femto LASIK in poteka v 2 korakih. Najprej se s femtosekundnim laserjem ustvari zelo tanek roženični pokrovček, nato pa se z excimer laserjem preoblikuje in odstrani spodnji – globlji del roženice.

Za odstranjevanje dioptrije, ki je po navadi posledica starosti pa uporabljo metodo PRESBYOND ZEISS, ki je vodena povsem računalniško.



Slika 9: laserska operacija oči

Laserje torej uporabljamo za operacije pri katerih je potrebna neizmerna natančnost, zato je laser postal nepogrešljiv pri operacijah.

Operacija z laserskim žarkom se uporablja tudi pri drugih operacijah, kot so odstranjevanje obolelega tkiva z rakom, pri čemer ne poškodujejo zdravih celic, kar je zelo pomembno, saj imajo druge metode zdravljenja raka več negativnih posledic zdravljenja. Uporablja se tudi pri zdravljenju žilnih sprememb, naravnih sprememb na koži, zdravljenje motenj spanja (smrčanja)....

Laserje uporabljajo tudi zobozdravniki, za vrtanje zob, ki je povsem brez bolečine. Tudi za zdravljenje vnetih obzobnih tkiv in preparacijo zobnih kron, pred izdelavo plomb in zalivanjem.

Zelo priljubljena je tudi uporaba laserja za lepotne namene. Velikokrat se uporablja za depilacijo, pomlajevanje kože, odstranjevanje peg in preoblikovanje napetosti kože.

Laser je in bo v prihodnosti še bolj zamenjal roko kirurga, saj je ta veliko bolj natančen, svetlobni žarek je vedno enakomeren in oddaja enako količino energije.

3.4.2 UPORABA LASERSKIH ŽARKOV V PREHRAMBENI INDUSTRIJI

3.4.2.1 Naprave z uporabo laserskih žarkov v prihodnosti

Laserska svetloba se bo v prihodnosti predvsem uporabljala za holograme in tudi za razne zabave, torej še boljše barvne svetlobne žarke. Laserji pa se nam bodo še bolj približali. Prišli bodo v naša gospodinjstva in nam olajšali vsakodnevna opravila. Ti laserji bodo seveda delovali v manjših močeh.

3.4.2.1.2 Hrana obdelana z laserjem

Laserji se uporabljojo tudi za razne očesne prevare. Ena izmed takšnih stvari je hrana, ki jo kupimo v trgovini. Nekatera živila, ki so že pripravljena za uživanje ali pa delno pripravljena, so obleščana s pomočjo laserja. To lahko opazimo na pol pečenih zrezkih. Na nekaterih so z laserjem narisane črte, ki naj bi bile sledi mreže za žar, vendar je to žal pri nekaterih živilih zgolj očesna prevara, da kupcem meso zgleda bolj naravno in ga kupijo brez večjega razmisleka.

Podobno lahko vidimo v konzerviranih ribah, kot so skuše ali sardine in tudi pri razni vloženi zelenjavi kot so šparglji. Črte narisane z laserjem lahko opazimo tudi na siru za žar. Velikokrat je na raznih živilih tudi kaj vgravirano s pomočjo laserja. Moramo biti torej pozorni na takšne izdelke, seveda niso vsi prišli v stik z laserjem, vendar se moramo prepričati ter raje kupiti sveže meso in zelenjavno.



Slika 10: graviranje na limono



Slika 11: graviranje v meso



Slika 12: šparglji obdelani z laserjem

3.5 MOČ LASERJEV

3.5.1 Osnove

Moč je glavna značilnost določenega laserskega sistema. Laserji z manjšo močjo imajo praviloma čas sežiganja večji, kot laserji z večjo močjo. Za moč laserja sta potrebna dva pogoja, da je svetloba monokromatska, kar pomeni da mora biti enobarvna in da je usmerjena vzporedno. Za učinkovito delovanje je še pomembna divergenca, to je kot pod katerim se širi svetlobni žarek. Divergentni kot laserskega snopa je zelo majhen, ni pa nič stopinj. Divergenca je torej najmanjša možna vrednost na osnovi fizikalnega pojava uklona svetlobe. Pripomore k temu, da je energija laserskega žarka usmerjena v najmanjšo možno površino. Povprečni kot pod katerim se širi svetloba pa je približno 1 mili radian.

3.5.1.2 Moči posameznih laserjev

Moči laserjev lahko segajo od 1 mW pa do približno 20 kW pri komercialnih laserjih, pri posebnih vojaških laserjih pa tudi več kot 1 MW. Kot sem že omenila, je za moč laserja zelo pomembno fokusiranje svetlobe. Povprečen premer tega fokusiranega žarka je 0.3 mm, kar pri moči laserja z 1kW, pomeni povprečno gostoto energije $1.4 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$. Za kazanje objektov v vesolju je dovolj že laser z zeleno svetlobo, z močjo do 20 mW. Z laserji, ki pa imajo vsaj malo večjo moč, kot ti s katerimi lahko kažemo objekte na zelo velikih razdaljah, pa lahko brez večjega napora pokajo balone in prižgejo vžigalice.

Tudi glede na moč lahko ločimo laserske kazalnike, na tiste, ki so varni za oči in na tiste, ki ob stiku z očesom pustijo posledice. Laserske naprave delimo v razrede: 1, 1 m, 2, 2 m, 3 R, 3 B in 4. Tako imenovane varne laserje uvrščamo med razrede 1, 1m in 2. To so laserji z močjo do 1 mW. Laserji razreda 2 so sicer nevarni, če bi z njim namerno svetil v oko dalj časa, v kolikor z laserjem razreda 2, v oko posvetimo po nesreči in je tak čas osvetlitve manjši od 0. 25 sec. ta ni škodljiv. Če pa v oko svetimo namerno in je ta čas večji pa lahko na očesu pusti posledice tudi laser razreda 2. Laserje z močmi od 5 mW do 100 mW uvrščamo med laserje razreda 3R in 3B. Po navadi pa bomo srečali tudi laserske označke IIIA in IIIB, saj takšne označke uporabljajo v Ameriki. Laserji z takšno močjo presegajo minimalno vrednost za naključno izpostavitev.

3.5.1.3 Kakšne debeline materialov lahko režejo?

Debeline materialov katere lahko režejo laserji so seveda odvisni od vrste laserja in njegove moči. Na primer, laser z močjo 4000 W lahko reže pločevino z debelino od 0.8 mm do 20 mm. Povprečno pa lahko laserji, ki jih uporabljam obrtniki in manjše tovarne režejo jeklo do debeline 25 mm, nerjaveče jeklo (inox) do debeline 30 mm, aluminij 30 mm, baker 12 mm in medenino do debeline 15 mm.

3.5.1.4 Katero materiale laserji najlažje režejo?

Laserji njenostavnejše razrežejo zelo tanke materiale. Najmanj energije potrebujejo za razrez papirja, kartona, tankega lesa, plastike in pene iz katere izdelujejo obeske za ključe. Večjo moč razreza pa potrebujejo laserji za razrez debelejših materialov, to je lahko že debelejši les, sledijo pa mu jeklo, inox, aluminij, baker, medenina.

3.5.1.5 Za razrez katerih materialov porabi laser največ časa?

Laserji potrebujejo več časa za razrez pri delu z debelejšimi materiali ter pri materialih kot so jeklo, aluminij, baker, ... Za razrez takšnih materialov poznamo druge laserje, ki so primerni samo za razrez trših materialov. Če laser za razrez potrebuje več časa, so posledično tudi stroški razreza večji.

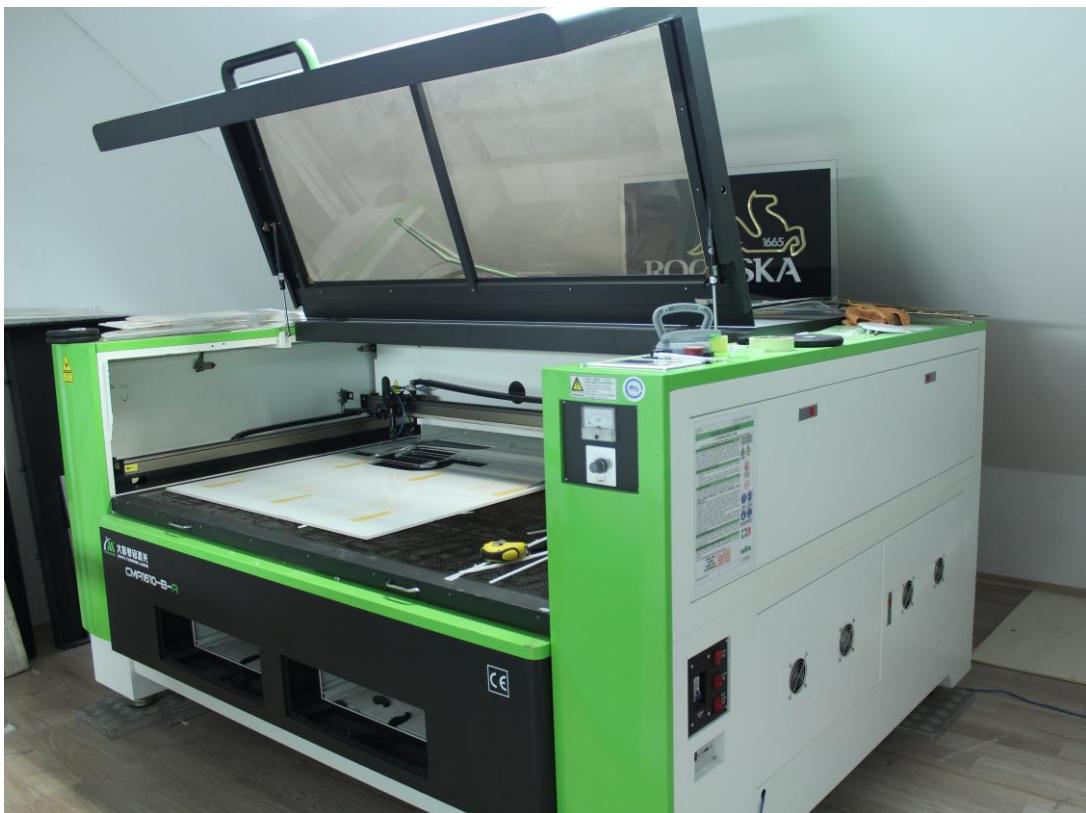
4 RAZISKOVALNO DELO

Za raziskovalno nalogu sem uporabljala CO₂ laser, model CMA1610-B-A.



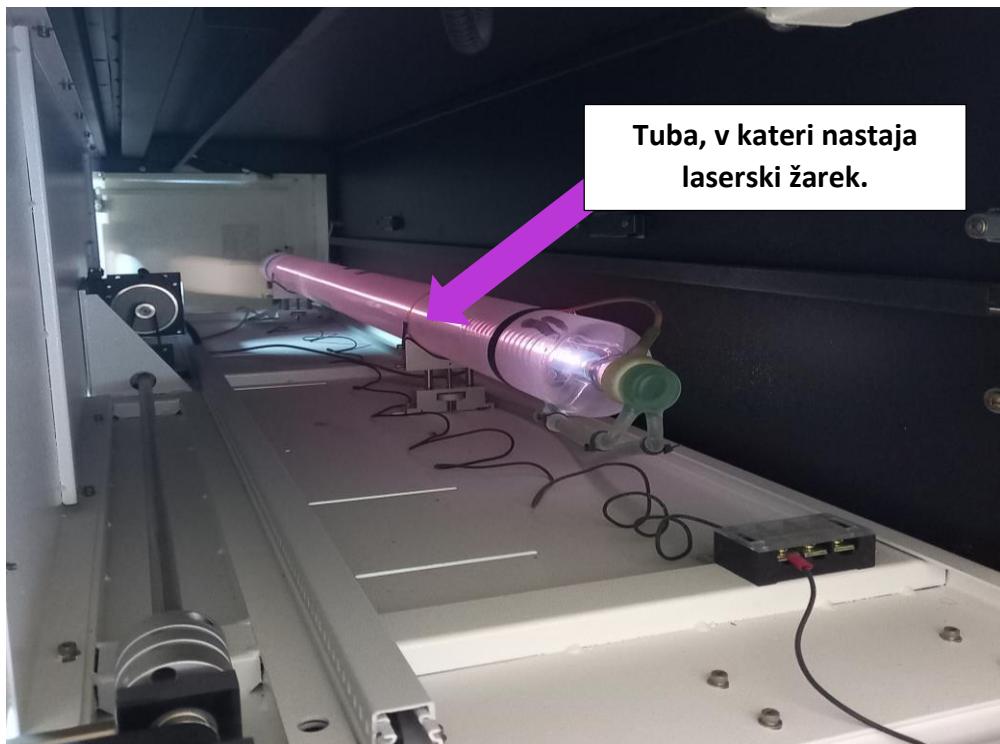
Slika 13: ime in model laserja

Spodnja slika prikazuje laser, ki sem ga uporabila v raziskavi. Njegova največja moč je 130W.

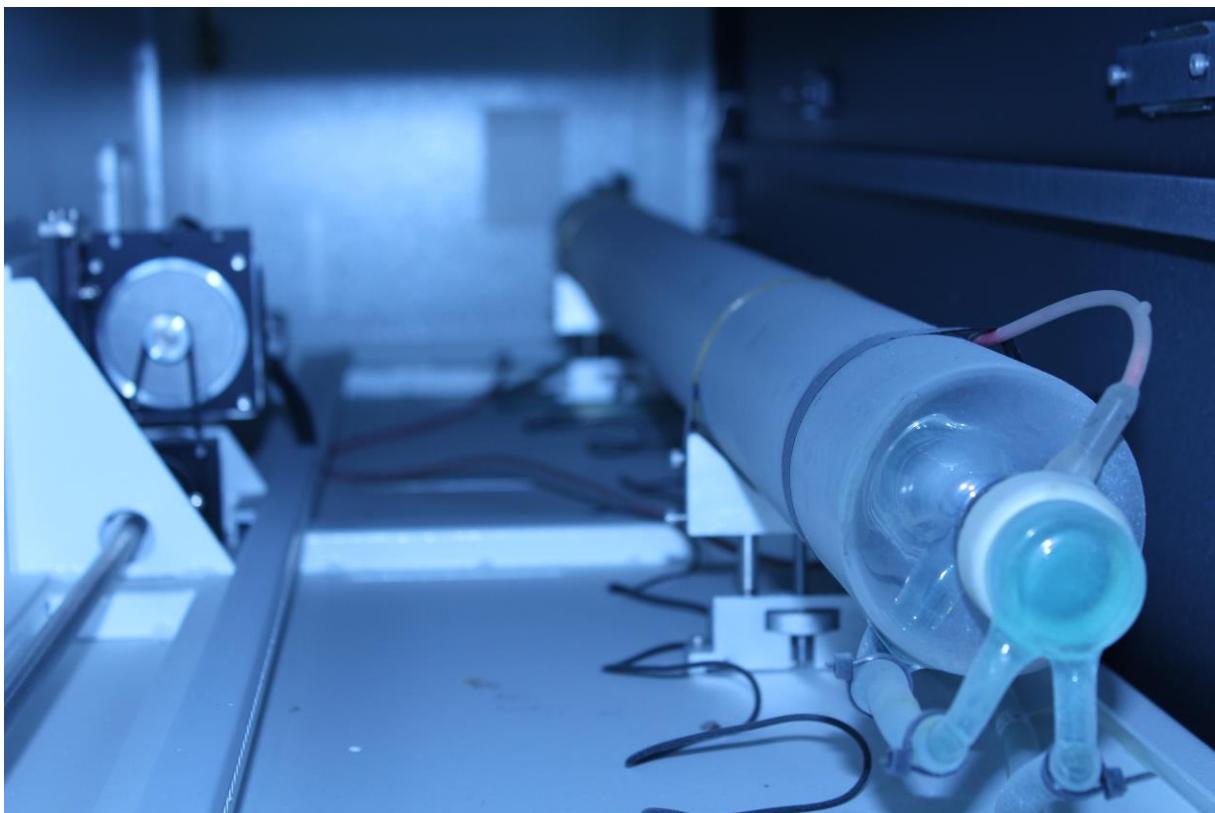


Slika 14: CO₂ laser uporabljen za raziskave

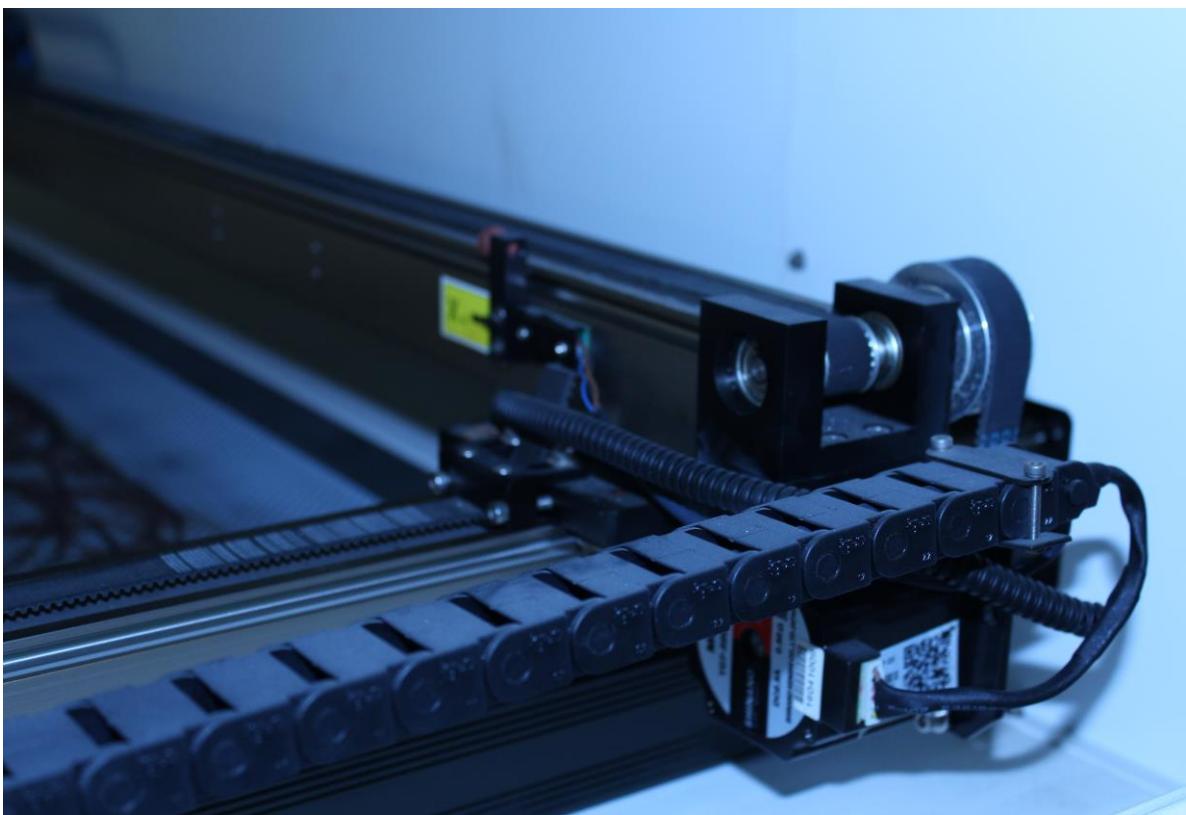
Laser CO₂ je sestavljen iz tube, mehanizem za premikanje glave po delovni površini laserja, glava laserja, ki obdeluje posamezni material. Vse sestavne dele prikazujejo spodnje slike.



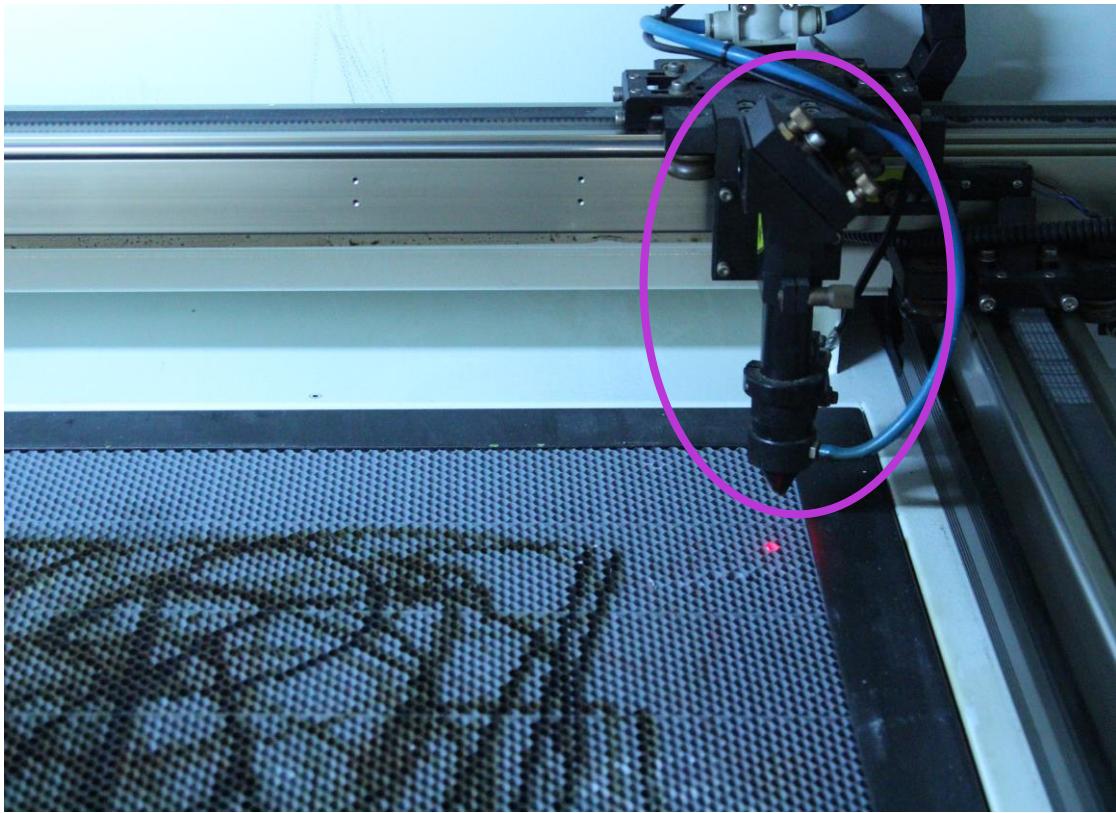
Slika 15: laserski žarek v tubi



Slika 16: tuba brez laserskega žarka



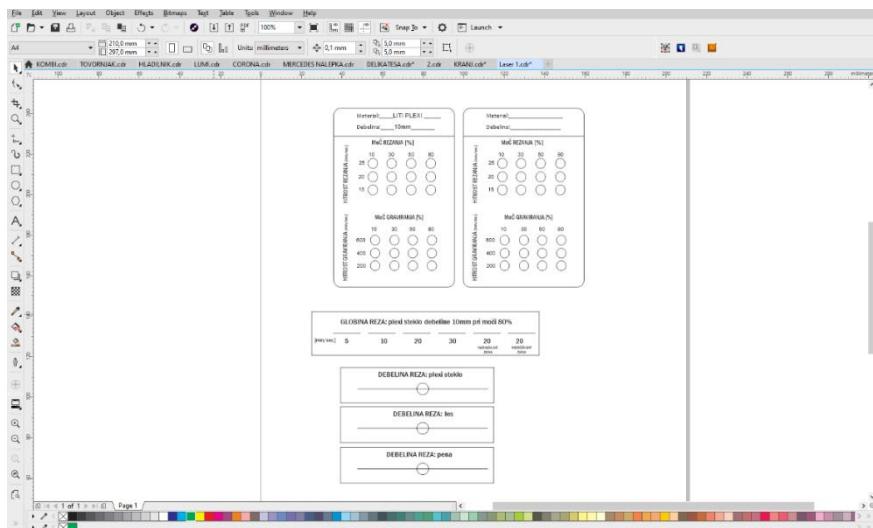
Slika 17: mehanizem za premikanje glave po delovni površini laserja



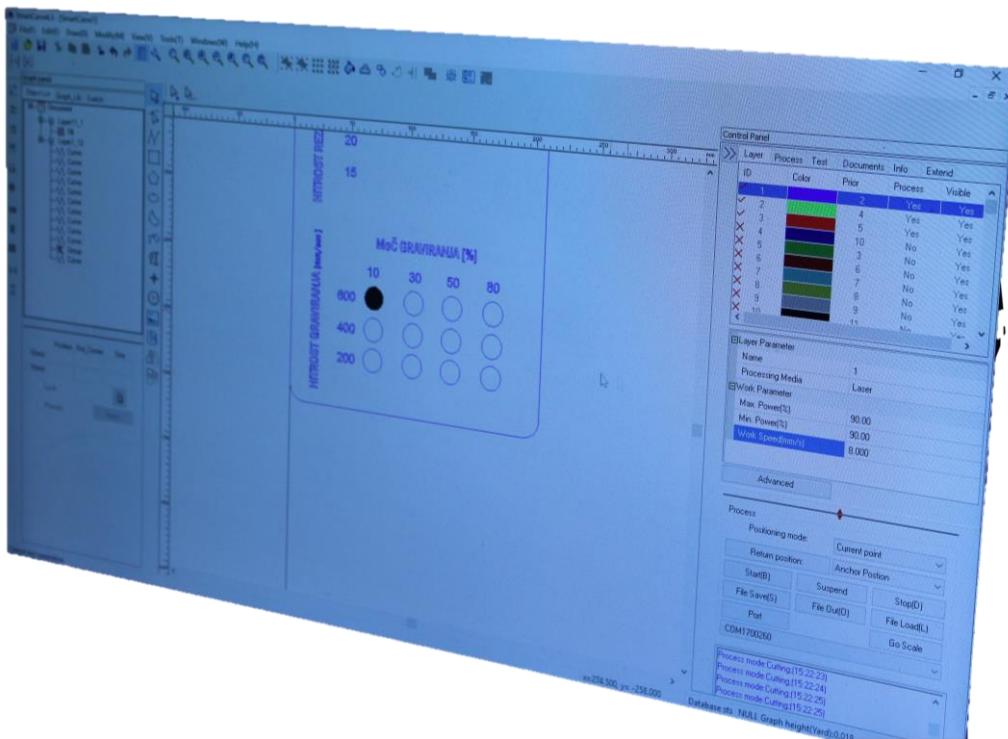
Slika 18: glava laserja

Za dokazovanje količine jakosti in hitrosti laserja, katera je potrebna za razrez ali graviranje različnih materialov, sem s pomočjo CO₂ laserja izdelala tabele razrezov in graviranja na pleksi steklu. Pri graviranju sem primerjala še graviranje na lesu. Tako sem ugotovila minimalno moč in hitrost laserja, ki je potrebna da prereže izbrane debeline pleksi stekla.

Osnove za izrez izdelkov sem narisala s pomočjo programa CorelDRAW.



Slika 19: posnetek zaslona oblikovanja v programu CorelDRAW



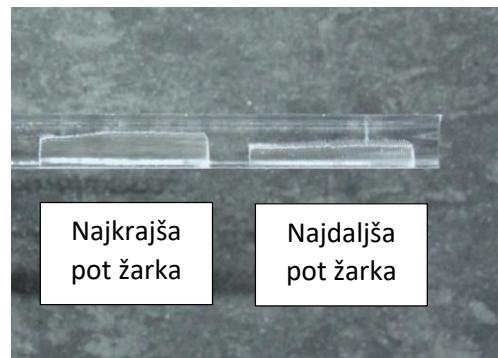
Slika 20: posnetek zaslona programa za laser

Najprej smo preučevali kako vpliva kje na delovni površini laserja stoji vzorec za razrez in ugotovili, da če je vzorec tam, kjer ima laser najkrajšo pot, je pri isti hitrosti in moči rez mnogo globlji, kot pri najdaljši poti. Zato smo v nadaljevanju vse meritve izvedli na legi kjer je laser imel najkrajšo pot.

Pri legi z najkrajšo potjo žarka, je bil rez za 1,86 mm globlji kot rez na legi z najdaljšo potjo žarka. Laserski žarek potuje iz tube, do glave laserja. Pri tem ga usmerjajo zrcala, ki so nastavljena pod kotom 45° . V levem spodnjem kotu delovne površine laserja, mora laserski žarek prepotovali daljšo pot in pri tem izgubi nekaj svoje moči. Zato je globina reza pri najdaljši poti žarka plitkejša.



Slika 21: primerjava reza pri isti moči in hitrosti na drugi poziciji delovne površine



Slika 22: primerjava reza pri isti moči in hitrosti na drugi poziciji delovne površine

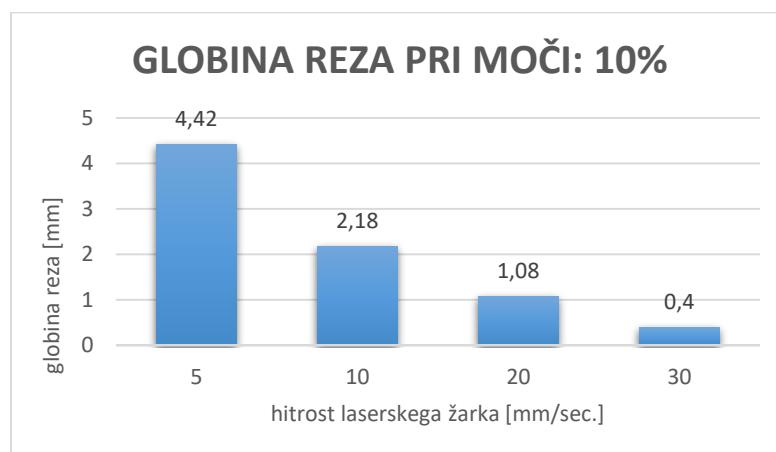
GLOBINE REZOV NA PLEXI STEKLU DEBELINE 10mm

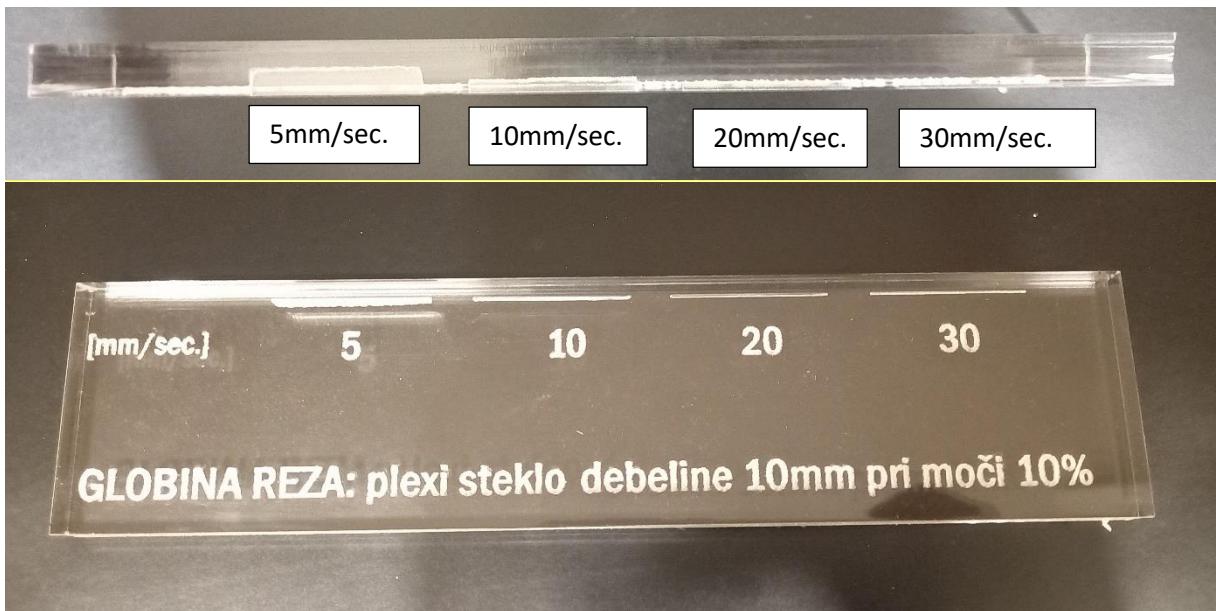
10% MOČ LASERJA

Tabela 1: moč laserja 10%

HITROST DELOVANJA LASERJA [mm/sec.]	5	10	20	30
DEBELINA REZA [mm]	4,42	2,18	1,08	0,40

Tabela 2: graf - moč 10%



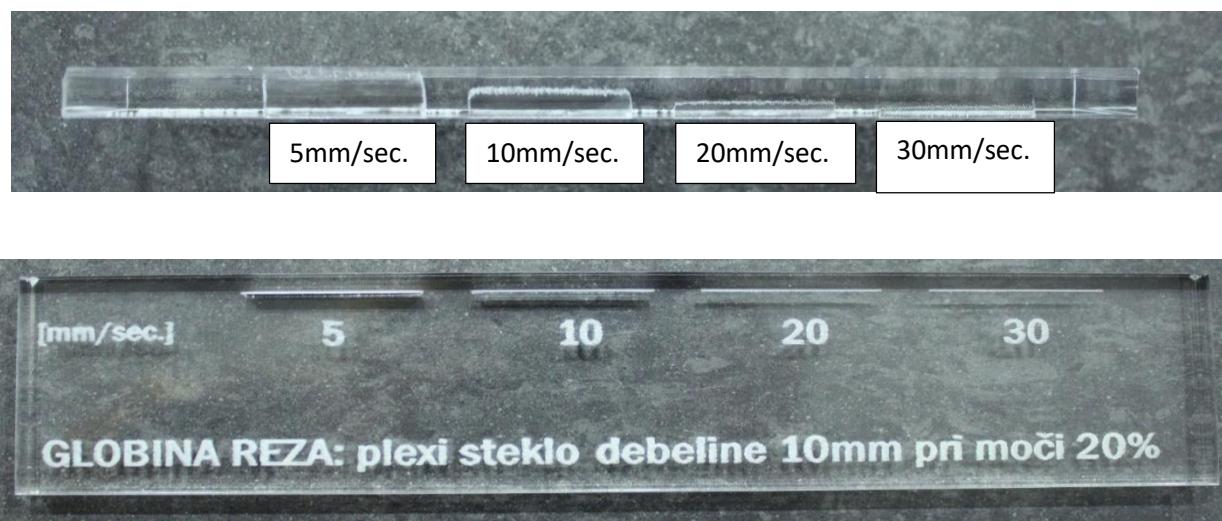


Slika 23: rezi na plexi steklu pri moči 10%

20% MOČ LASERJA

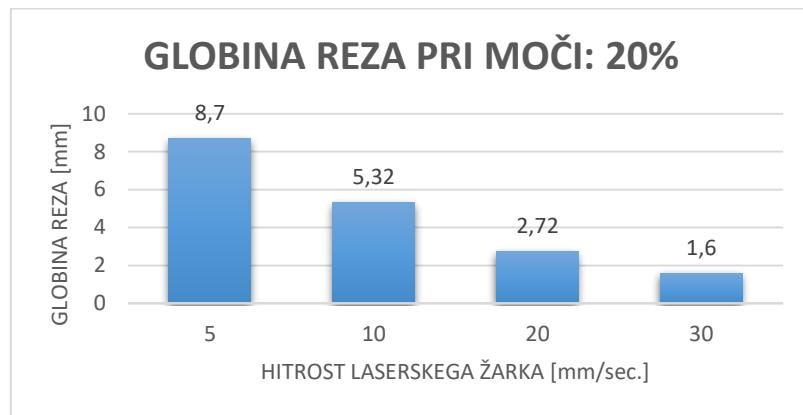
Tabela 3: moč laserja 20%

HITROST DELOVANJA LASERJA [mm/sec.]	5	10	20	30
DEBELINA REZA [mm]	8,70	5,32	2,72	1,60



Slika 24: rezi na plexi steklu pri moči 20%

Tabela 4: graf - moč 20%

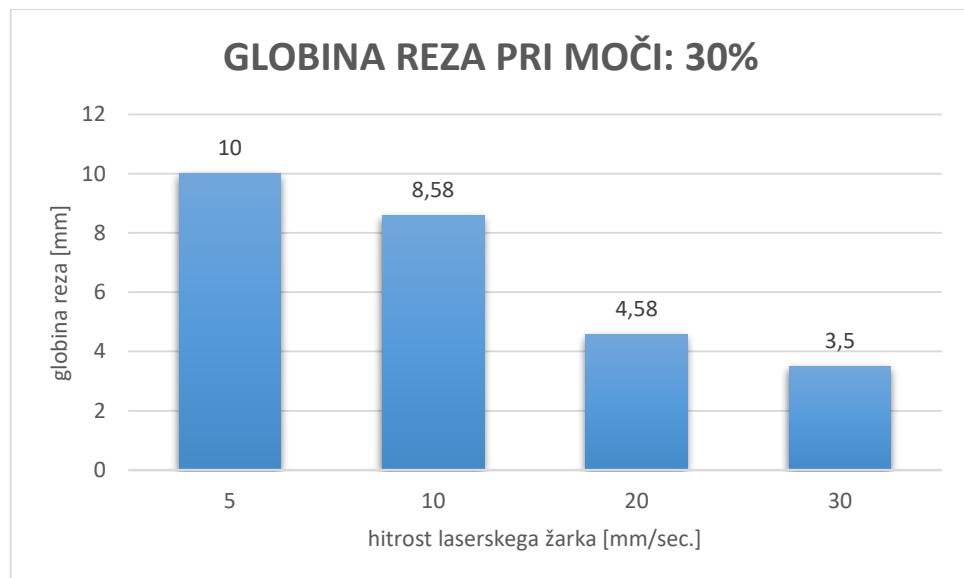


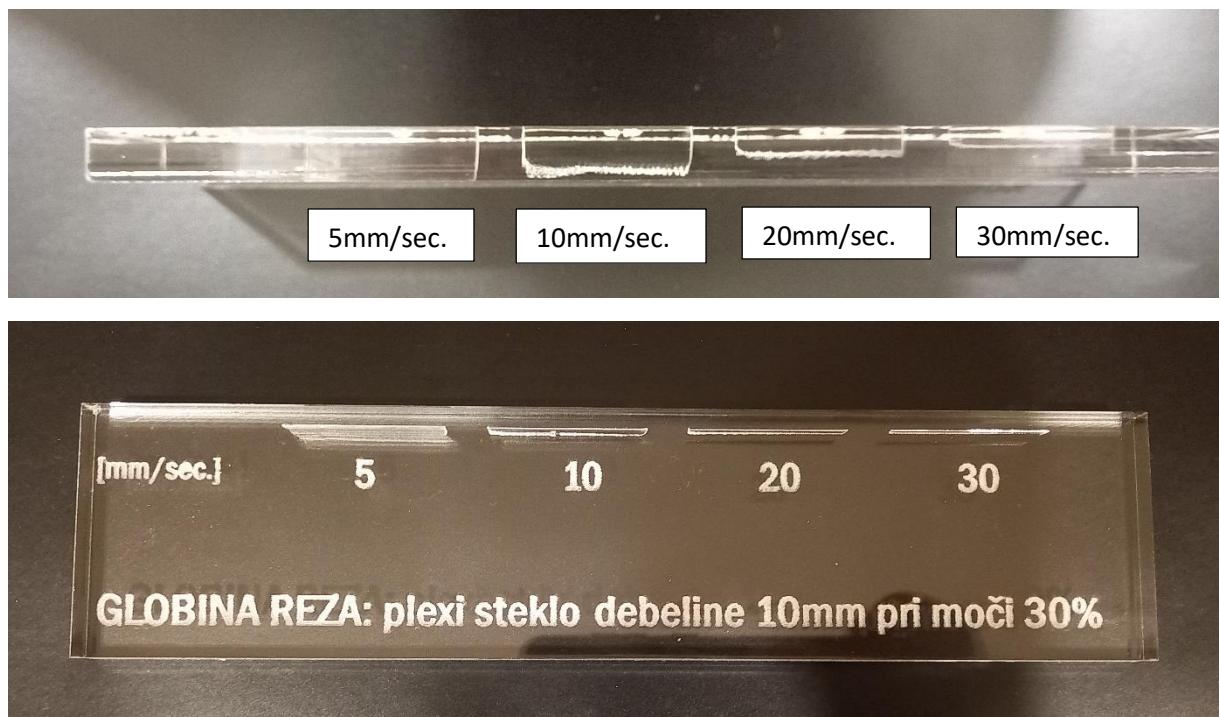
30% MOČ LASERJA

Tabela 5: moč laserja 30%

HITROST DELOVANJA LASERJA [mm/sec.]	5	10	20	30
DEBELINA REZA [mm]	10	8,58	4,58	3,50

Tabela 6: graf - moč 30%





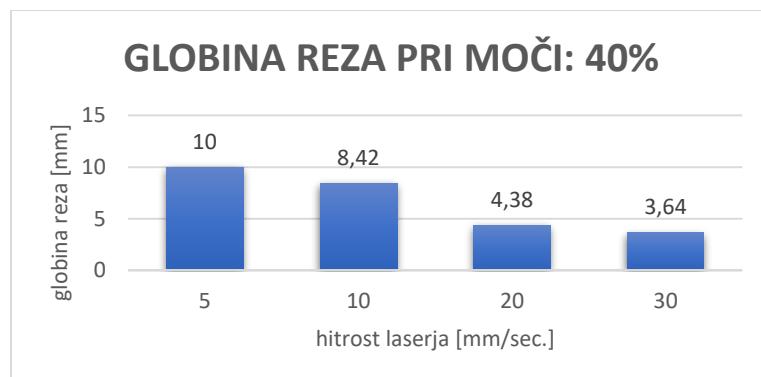
Slika 25: rezi na plexi steklu pri moči 30%

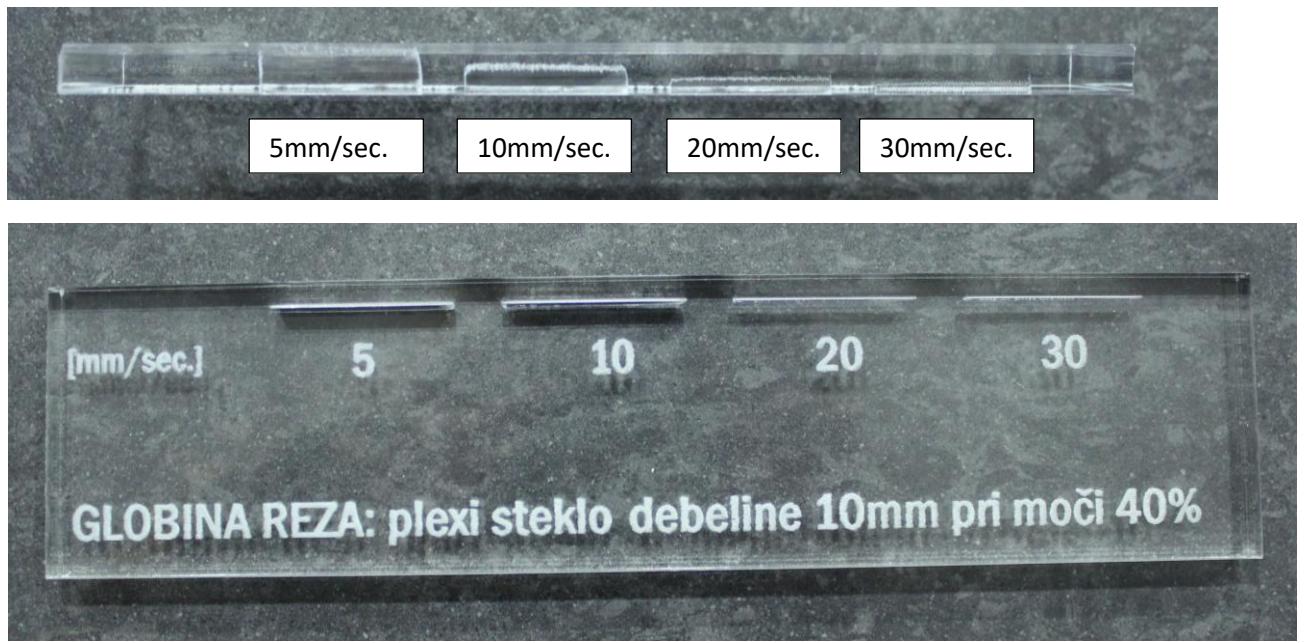
40% MOČ LASERJA

Tabela 7: moč laserja 40%

HITROST DELOVANJA LASERJA [mm/sec.]	5	10	20	30
DEBELINA REZA [mm]	10	8,42	4,38	3,64

Tabela 8: graf - moč 40%





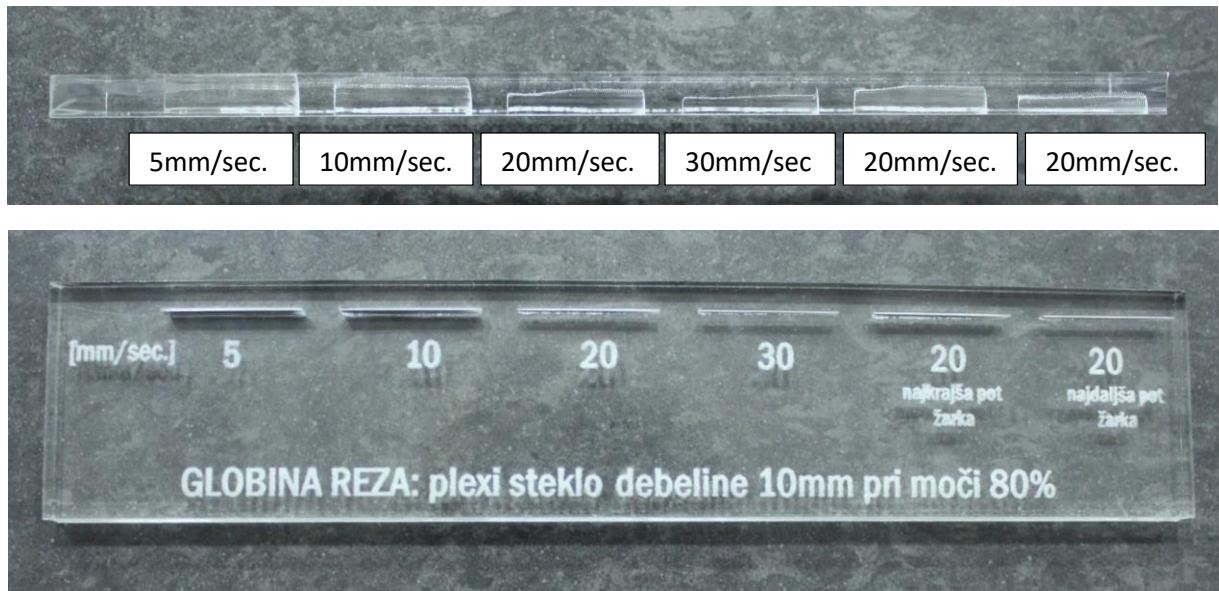
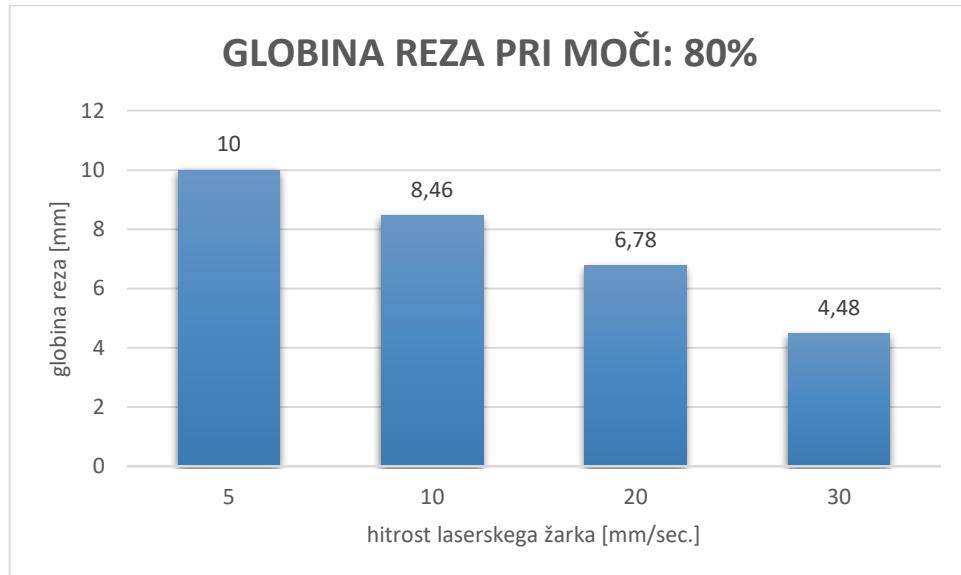
Slika 26: rezi na plexi steklu pri moči 40%

80% MOČ LASERJA

Tabela 9: moč laserja 80%

HITROST DELOVANJA LASERJA [mm/sec.]	5	10	20	30
DEBELINA REZA [mm]	10	8,46	6,78	4,48

Tabela 10: graf - moč 80%



Slika 27: rezni na plexi steklu pri moči 80%

Pri moči 100% se laserja ne uporablja, saj se lahko med delovanjem s polno močjo poškoduje.

Iz meritev smo ugotovili, da laser prereže pleksi steklo skozi njegovo celotno debelino, že pri moči 30% in hitrosti 5mm/sec. Iz praktičnih razlogov je smiselno zato laser uporabljati pri manjši moči, saj prav tako prereže željeno debelino materiala. Laserju naj bi se zaradi manjših obremenitev življenjska doba podaljšala.

Nato sem ugotovljala, kako moč, s katero laser deluje, vpliva na globino reza pri konstantni hitrosti. Narisala sem grafe. Najprej sem pripravila tabelo in narisala grafe pri hitrosti 5mm/sec in tako nadaljevala za vse hitrosti.

Tabela 11: tabela in graf za hitrost 5mm/s

HITROST 5mm/s	
% MOČI	GLOBINA REZA V mm
10	4,42
20	8,7
30	10
40	10
80	10

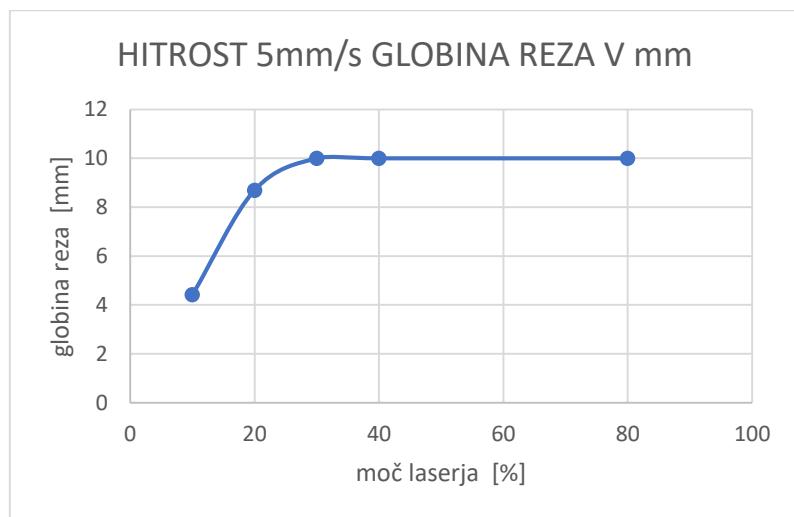


Tabela 12: tabela in graf za hitrost 10mm/s

HITROST 10mm/s	
% MOČI	GLOBINA REZA V mm
10	2,18
20	5,32
30	8,58
40	8,48
80	10

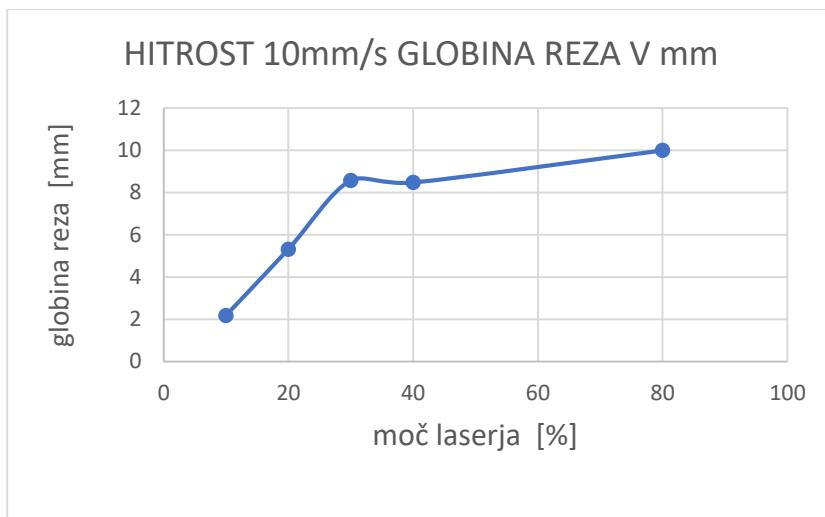


Tabela 13: : tabela in graf za hitrost 20mm/s

HITROST 20mm/s	
% MOČI	GLOBINA REZA V mm
10	1,08
20	2,72
30	4,58
40	4,38
80	6,78

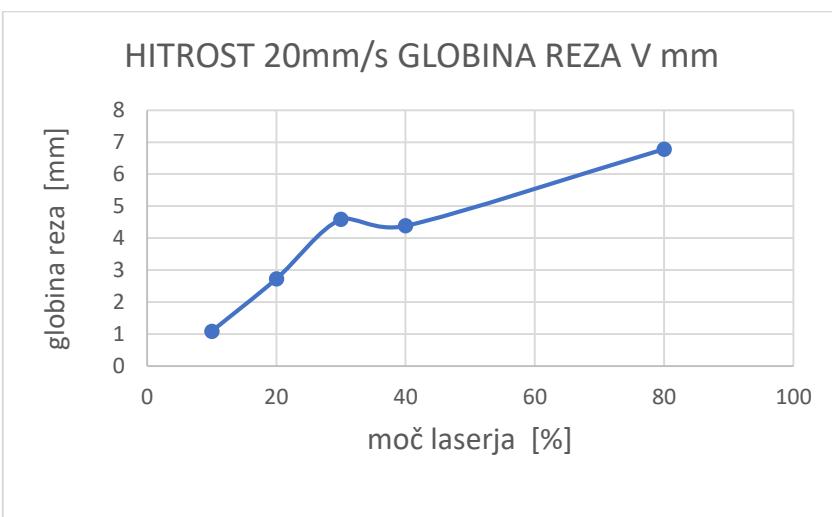
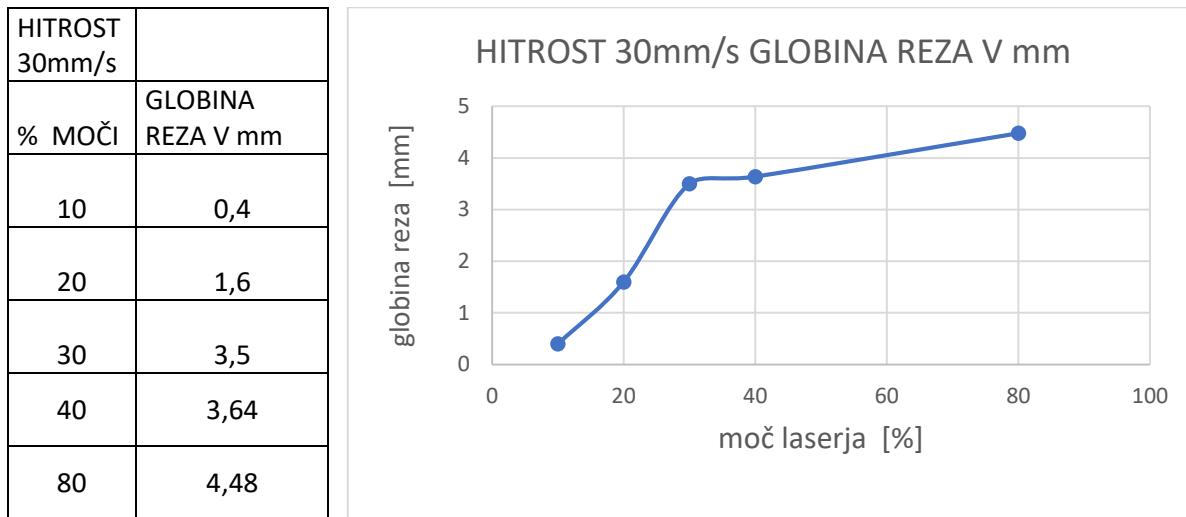


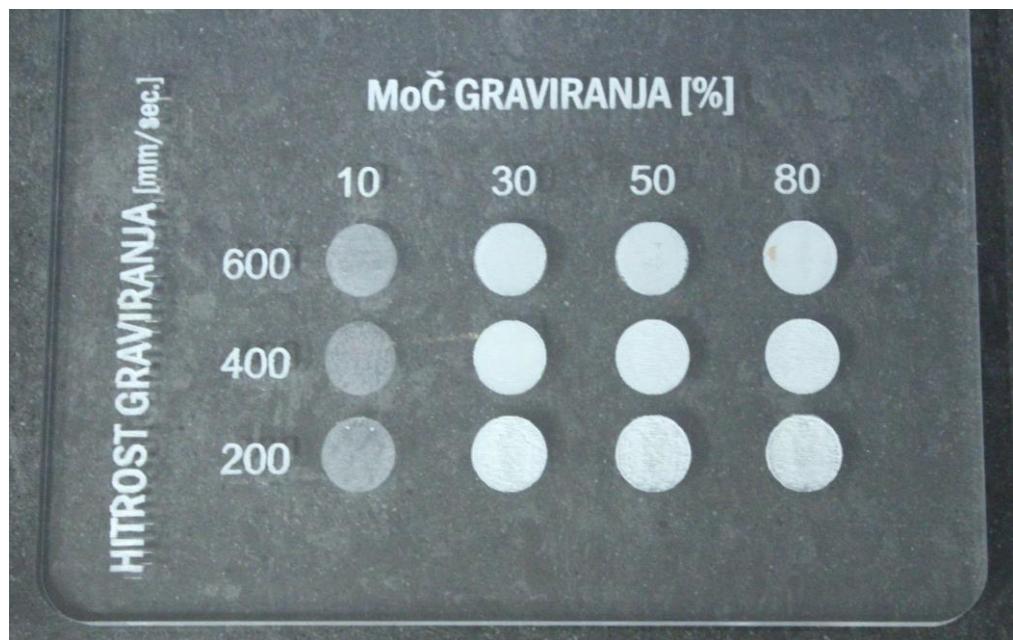
Tabela 14:: tabela in graf za hitrost 30mm/s



Ugotovila sem, da je za razrez pleksistekla najpomembnejša količina hitrost premikanja laserske glave po materialu. Za razrez je najboljša najmanjša hitrost to je 5 mm/s in dovolj je že nastavitev delovanja na 30% moč. S tem ko je manjša moč pa se laser ohranja in bo deloval dlje.

V drugem delu raziskave sem raziskovala graviranje. Na pleksi steklo sem gravirala z različnimi močmi in hitrostmi žarka ter ugotovila, da laser najučinkovitejše gravira z 80% močjo ter hitrostjo 600mm/sec. Pri takšni moči in hitrosti nastane najlepša gravura, brez popačenih delov. Pri počasnejšem delovanju laserja so gravure naravne in ponekod pregloboke. Pri moči 10% pa so gravure zelo plitke in se skoraj ne vidijo.

Ugotovila sem, da je za graviranje najbolje laser nastaviti na dokaj visoko hitrost in moč.

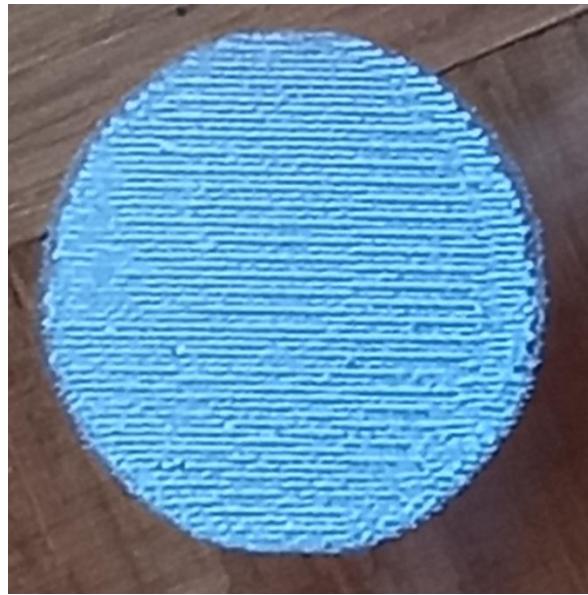


Slika 28: graviranje na plexi steko

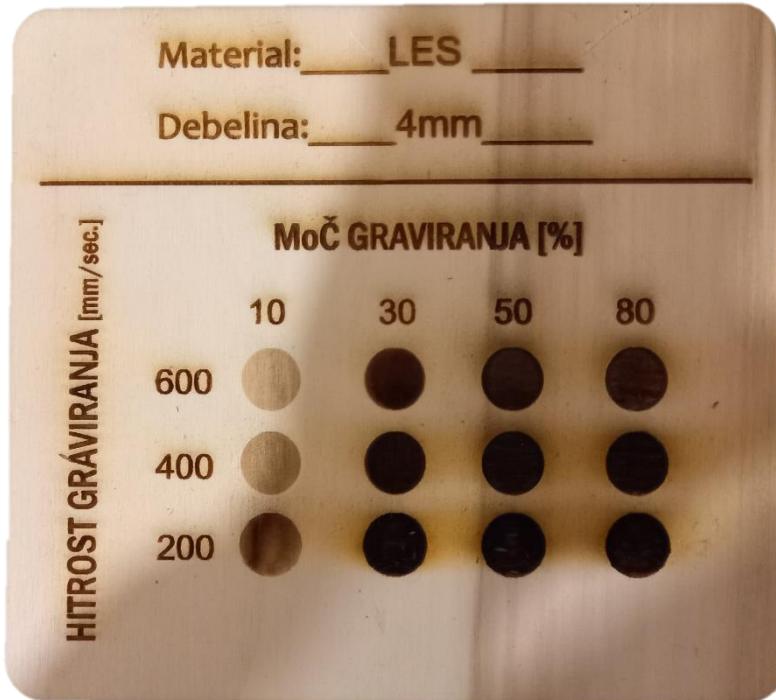
Primerjala sem tudi moči in hitrosti graviranja pri lesu, ter ugotovila, da je pri lesu zadostna bistveno manjša moč ter hitrost za najučinkovitejše gravure. Pri moči 80% ter hitrosti 200mm/sec. je gravura skoraj prezala les debeline 4mm.



Slika 29: gravura - moč 80%, hitrost - 200mm/sec



Slika 30: gravura - moč 30%, hitrost 600mm/sec

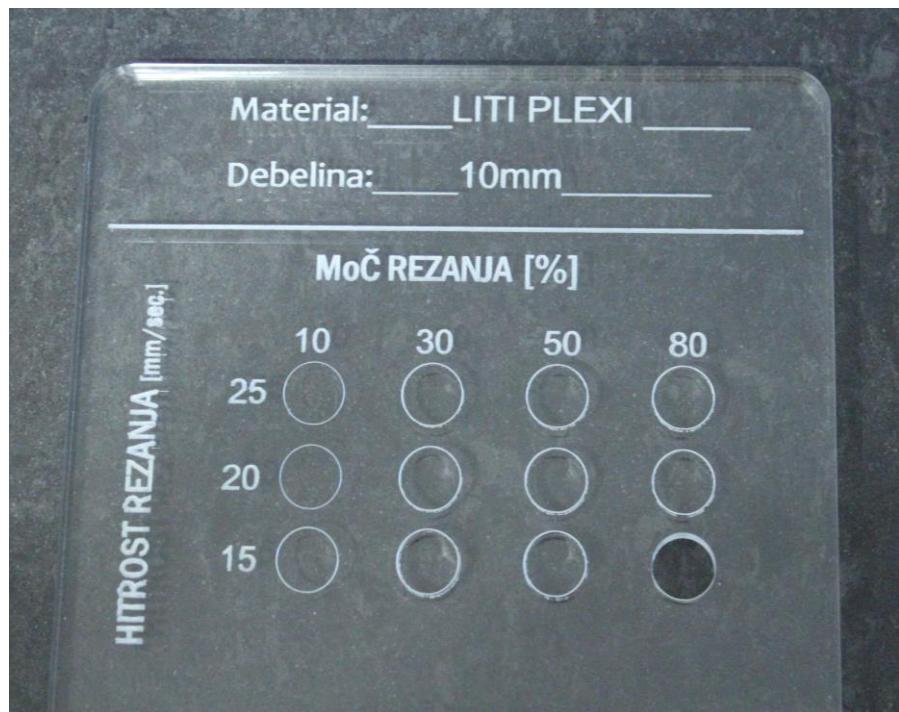


Slika 31: graviranje na les

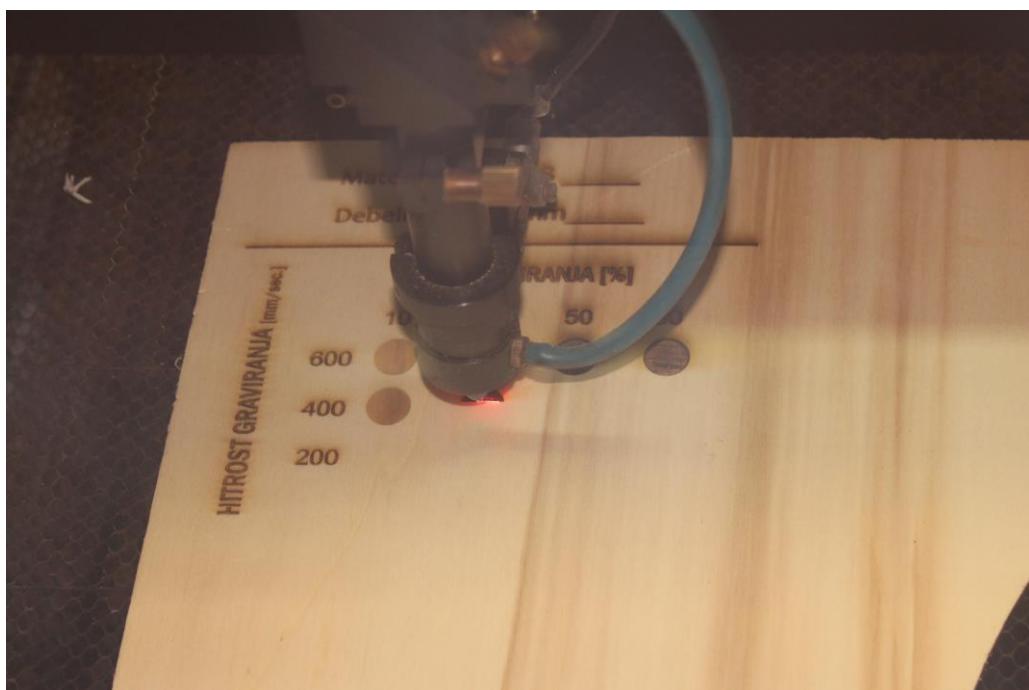
Iz tega vzorca lahko razberemo, da je pri graviranju pomembna predvsem hitrost, tako lahko z manj energije dobimo gravure, ki so najlepše.

Globine reza na lesu nisem preverjala, saj se le ta vidi pri pleksi steklu zaradi njegove prozornosti.

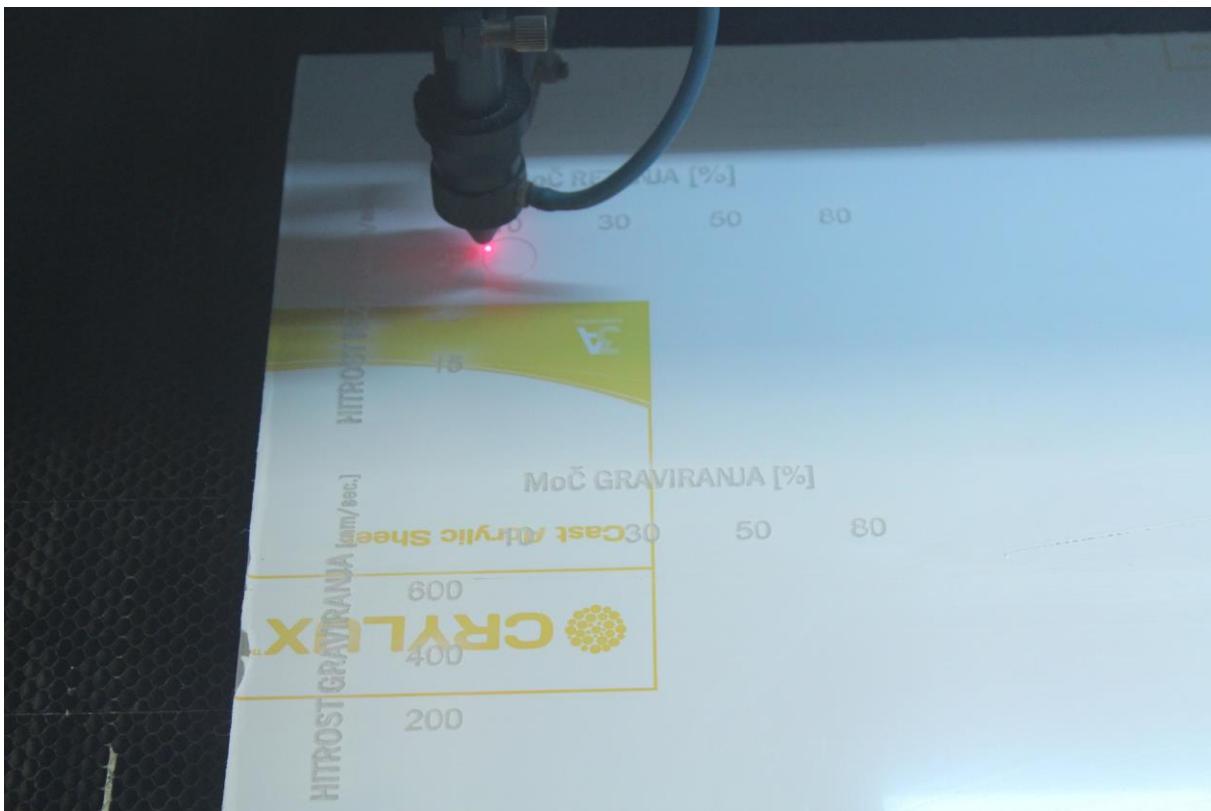
Za opazovanje globine rezov sem prav tako izbrala pleksi steklo, saj je ta prozoren in se globine tako najbolje vidijo in tudi izmerijo. Pri moči 80% ter hitrosti 15mm/sec. je laser 10mm debelo steklo prerezial skozi celotno globino. Pri moči 10% ter hitrosti 25mm/sec. pa je rez komaj da viden.



Slika 32: rezanje v plexi steklo

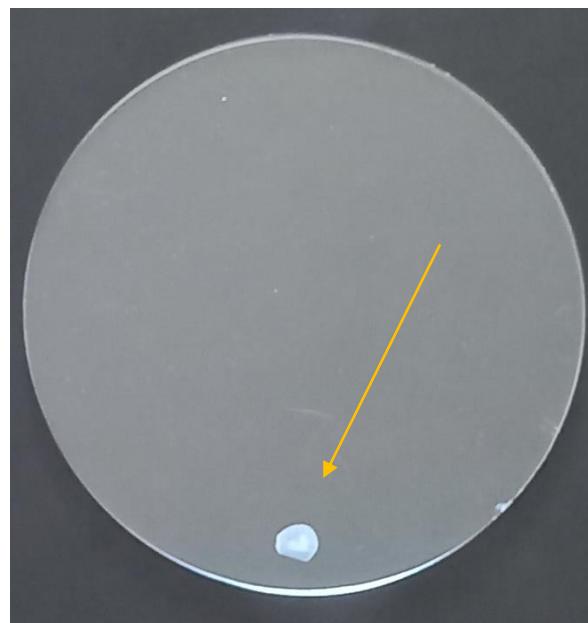


Slika 33: laser med delom



Slika 34: laser med delom

Izmerili smo tudi premer kroga, ki ga laserski žarek zažge neposredno na material, ne da bi pri tem potoval skozi zadnje zrcalo ter glavo laserja. Kos pleksi stekla smo namestili na pot žarka pred glavo laserja, ter za kratek čas vklopili laser. Na pleksi steklu je laserski žarek pustil sled premera 6mm.



Slika 35: sled laserskega žarka

5 POTRDITEV HIPOTEZ

HIPOTEZA 1: Moč laserja vpliva na udorno globino reza. **POTRJENO** (To hipotezo sem potrdila s primerjanjem globin rezov na pleksi steklu, pri isti hitrosti ter različnih močeh. Globina reza je bila pri večji moči večja, kot pri manjši moči)

HIPOTEZA 2: Hitrost delovanja laserja vpliva na udorno globino reza. **POTRJENO** (Tudi to hipotezo sem potrdila s primerjanjem globine reza na pleksi steklu, vendar pri enakomerni moči, ter različnimi hitrostmi. Počasnejši, kot je bil laserski žarek, večja je bila globina reza.)

HIPOTEZA 3: Pri graviranju sta hitrost in moč nepomembna. **OVRŽENO** (Moč in hitrost sta zelo pomembna, predvsem je za lepo gravuro pomembna visoka hitrost. To hipotezo sem ovrgla, na podlagi gravur, ki jih je laser izdelal pri različni moči ter različni hitrosti. Pri gravuri, ki je bila narejena s počasno hitrostjo, ta ni bila enakomerna in estetsko lepa.)

HIPOTEZA 4: Lega postavitve objekta na delovno površino laserja nima vpliva na globino reza. **OVRŽENO** (Daljšo pod kot mora laserski žarek prepotovati do želenega objekta, plitkejši je rez v izbran material. To hipotezo sem ovrgla s poskusom, da sem pleksi steklo enkrat postavila na mesto, kjer ima žarek najkrajšo pot, drugič, pa na mesto, kjer ima žarek najdaljšo pot. Laser je na obeh mestih deloval z enako močjo ter hitrostjo. Izmerjena globina reza je bila na mestu, kjer je pot žarka najkrajša, globlja, kot na mestu z najdaljšo potjo žarka.)

6 ZAKLJUČEK

Cilj moje raziskovalne naloge je bil dosežen. Bolj podrobno sem spoznala različne vrste laserjev ter njihovo delovanje. Ugotovili smo, da je za graviranje bolj pomembna hitrost, kot pa moč laserskega žarka, kar je koristno za samo življensko dobo laserja. Izvedeli smo tudi, da je pomembna sama lega postavitve objekta, ki ga želimo obdelati z laserjem, na delovno površino. Kot pričakovano, smo iz primerov videli, da je pri polovični hitrosti, globina reza približno za polovico manjša. Prav tako sem ugotovila, da laser prereže pleksi steklo skozi njegovo celotno debelino, že pri moči 30% in hitrosti 5mm/sec. To je za samo delovanje laserja zelo pomembno, saj če laser uporablja pri manjši moči, prav tako prereže željeno debelino materiala, laserju se tako zaradi manjših obremenitev življenska doba podaljšala.

V sami proizvodnji imajo sedaj natančno ugotovljeno, kakšna je moč in hitrost, ki jo morajo nastaviti, za prerez določene debeline pleksi stekla. Pleksi steklo je pri njih najpogostejši material, ki ga obdelujejo z laserjem.

7 SEZNAM LITERATURE:

- KUŠČER, Ivan, idr. 2002. *Fizika za srednje šole: 3. del.* Ljubljana: DZS. ISBN 86-341-2849-0.
- Kvarkadabra. 2000. Kako deluje laser? Dostopno na: <https://kvarkadabra.net/2000/01/laser/> [9. 1. 2021]
- Wikipedija. Koherentno valovanje. Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Koherentno_valovanje [9. 1. 2021]
- Wikipedija. Foton. Dostopno na: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Foton> [9. 1. 2021]
- ČETKOVIČ, Goran. 1999. Laser in njegova uporaba. Dostopno na: <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html#razvoj> [9. 1. 2021]
- Wikipedija. Geodezija. Dostopno na: <https://sl.wikipedia.org/wiki/Geodezija> [9. 1. 2021]
- Leading computer services. Osnove laserskega rezanja. Dostopno na: <https://sl.leadingcomputerservices.com/61222-Laser-Cutting-Basics-54> [16. 1. 2021]
- 2R FLY. Dostopno na: https://www.modelarstvo.si/kaj-je-laser/#Lastnost_laserske_svetlobe [18. 1. 2021]
- Zlahkoto. Dostopno na: <http://astronomija.zlahkoto.si/?q=node/10> [18. 1. 2021]
- Metal design. Dostopno na: <https://www.metaldesign.si/sl/serijska-proizvodnja/tehnologija/laserski-razrez> [18. 1. 2021]
- Trotec. Dostopno na: <http://www.troteclaser.si/vrste-laserskih-strojev/> [18. 1. 2021]
- D center. Dsotopno na: <https://www.d-center.si/implantologija/> [18. 1. 2021]

7.1 VIRI SLIK:

- Slika 1. <https://kvarkadabra.net/2000/01/laser/>
- Slika 2. <https://kvarkadabra.net/2000/01/laser/>
- Slika 3. <https://kvarkadabra.net/2000/01/laser/>
- Slika 4. <https://www.geoshop.si/k/4-1-1/Merilni-instrumenti/Laserski-razdaljemerji/Laserski-razdaljemerji>
- Slika 5. <http://foto-gm.si/graviranje/les/graviranje-v-les.html>
- Slika 6. <http://www.graverstvo-kovac.si/>
- Slika 7. <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html#lastnosti>
- Slika 8. <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html#lastnosti>
- Slika 9. <https://siol.net/trendi/zdravo-zivljenje/kaj-je-laserska-operacija-dioptrije-in-za-koga-je-primerna-492344>
- Slika 10. <https://www.bespokelaseruk.co.uk/laser-cutting/laser-cutting-a-lemon/>
- Slika 11. http://en.nordicmarine.net/katalog?mode=product&product_id=3299800
- Slika 12. <https://z-laser.com/en/all-articles/cutting-line-displays-for-vegetables-meat-pieces-or-fish-with-laser-projection//en>