

# Tehnologije obrade laserom i fokus-test na stroju LINEXO

---

Stepan, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:295798>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad br. 419/PS/2023**

# **Tehnologije obrade laserom i fokus-test na stroju LINEXO**

**Stepan Marija, 0035219612**

Varaždin, listopad 2023. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 419/PS/2023

## Tehnologije obrade laserom i fokus-test na stroju LINEXO

**Student**

Stepan Marija, 0035219612

**Mentor**

Dr. sc. Jasna Leder Horina, mag.ing.

Varaždin, listopad 2023. godine

# Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

**ODJEL** Odjel za Strojstvo

**STUDIJ** Stručni prijediplomski studij Proizvodno strojarstvo

**PREDAVAČ** Marija Stepan

**MATIČNI BROJ** 0035219612

**DATA** 6.9.2023.

**PRILIK** Mehhanika 2

**NASLOJ RADA** Tehnologije obrade laserom i fokus-test na stroju LINEXO

**NASLOJ RADA NA ENGL. JEZIKU** Laser processing technologies and focus test on the LINEXO machine

**MENTOR** dr.sc. Jasna Leder Horina

**STANJE** docent

**ČLANOVI POVJERENSTVA**

1. izv.prof.dr.sc. Sanja Šofč, predsjednik

2. doc.dr.sc. Matija Bušić, član

3. doc.dr.sc. Jasna Leder Horina, mentor

4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjena

5. \_\_\_\_\_

## Zadatak završnog rada

**BR** 419/PS/2023

**OPIS**

U završnom radu je potrebno u uvodnom dijelu rada temeljem dostupne literature objasniti tehnologiju lasera, gdje je potrebno započeti s pojašnjenjem teorije o laserima i svim pojmovima koji su vezani za tehnologiju lasera. Potrebno je objasniti fizikalne osnove pojmova svjetlost, foton i laserska zraka, laserska emisija te objasniti samu građu lasera. Potom je potrebno objasniti tehnologiju lasera u inženjerskoj primjeni kao i primjeru lasera u industriji. U eksperimentalnom djelu rada potrebno je napraviti fokus test na stroju LINEXO. Dobivene rezultate je potrebno analizirati te donijeti zaključke na temelju provedene analize.

ZADATAK UPUŠEN

05.09.2023

POTVRBA MENTORA

Jasna Leder Horina

SVEUČILIŠTE  
SIEVER

## **Predgovor**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentorici dr.sc. Jasni Leder Horina na velikoj pomoći, potpori i savjetima tijekom pisanja završnog rada.

Vielen Dank an die Innolas Solutions GmbH, deren Hilfe meine Bachelorarbeit überhaupt ermöglicht hat.

## Sažetak

Ovaj završni rad bavi se laserima i njihovom primjenom, a prva se cjelina odnosi na pojašnjenje glavnih pojmova koji su važni za razumijevanje principa rada lasera. Za to je potrebno razumjeti što su svjetlost i fotoni te kako laserska zraka uopće nastaje. Obradom spontane i stimulirane emisije te inverzije napučenosti dolazi se do uvjeta laserske emisije i kako ona funkcionira.

Rad se također bavi građom lasera da bi se moglo razumjeti kako njegovi dijelovi utječu na stvaranje laserske zrake pa time i njenim održavanjem koje se zatim primjenjuje u laserskim procesima.

Tehnologije obrade laserom su široke primjene i dio su modernih tehnologija koje u današnjici uvelike pomažu u industriji mikročipova, solarnih panela i slično. Bitno je naglasiti glavne tehnologije koje se danas koriste, ali i nove tehnologije koje privatne osobe razvijaju i patentiraju.

Za kraj, rad se bavi jednim od najvažnijih testova u kalibraciji laserskih strojeva – fokus-testom. Nakon provedenog je eksperimenta potvrđeno zašto je točno i precizno funkcioniranje lasera od velike važnosti za njegov ispravan rad te daljnje korištenje u konkretnim obradama.

Ključne riječi: laser, laserska zraka, tehnologija, obrada laserom, fokus-test, industrija mikrodijelova, kalibracija stroja

## **Abstract**

The main scope of this thesis is about lasers and their application. First chapter deals with the explanation of the most important concepts that are significant for understanding the principles of how laser works. It is valuable to understand what light and photons are and how a laser beam even develops. With understanding what spontaneous and stimulated emissions are, and what an inversion of population is, the requirements for laser emission are and how it works can be set.

Furthermore, the thesis deals with the structure of the laser in order to understand how its parts affect the creation of the laser beam and thus its maintenance, which is then applied in laser processes.

Laser processing technologies have a variety of usages and are part of modern technologies which help in today's microchip, solar panel, or similar industries. It's important to emphasize the main technologies which are used today, as well as new ones which are developed and patented by individuals.

In the last part, this paper deals with one of the most important tests for laser calibration – the Focus-Test. After the experiment is conducted, it is explained why correct and precise work of a laser is important and its further application.

Key words: laser, laser beam, technology, laser processing, Focus-Test, microparts industry, machine calibration



## Popis korištenih kratica

<b>IBC</b>	eng. <i>Interdigitated Back Contact</i>
<b>LASER</b>	eng. <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
<b>LCO</b>	eng. <i>Laser Contact Opening</i>
<b>LDC</b>	eng. <i>Laser Direct Cleaving</i>
<b>LDSE</b>	eng. <i>Laser Doped Selective Emitter</i>
<b>PCB</b>	eng. <i>Printed Circuit Board</i> ili tiskana pločica
<b>PERC</b>	eng. <i>Passivated Emitter and Rear Contact</i>
<b>UKP</b>	Ultrakratki impulsni laser

## Popis korištenih veličina

<b><i>E</i></b>	[J]	energija oscilatora
<b><i>h</i></b>	[J · s]	Planckova konstanta
<b><i>n</i></b>	[-]	cijeli broj
<b><i>z</i></b>	[mm]	korak
<b><i>v</i></b>	[s <sup>-1</sup> ]	frekvencija

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Princip rada lasera.....	3
2.1.	Svjetlost i fotoni .....	3
2.1.1.	<i>Svjetlost</i> .....	3
2.1.2.	<i>Fotoni</i> .....	3
2.2.	Glavni procesi nastanka laserske svjetlosti .....	4
2.2.1.	<i>Spontana emisija</i> .....	5
2.2.2.	<i>Stimulirana emisija</i> .....	5
2.2.3.	<i>Inverzija napučenosti</i> .....	6
2.3.	Uvjeti laserske emisije .....	7
3.	Građa lasera .....	8
3.1.	Laserski medij .....	8
3.2.	Optička pumpa .....	8
3.3.	Optički rezonator.....	9
4.	Laserski procesi u strojarstvu.....	10
4.1.	Ultrakratki impulsni laser.....	10
4.2.	Tehnologije obrade laserom .....	11
4.2.1.	<i>Depaneliranje</i> .....	11
4.2.2.	<i>Lasersko bušenje</i> .....	12
4.2.3.	<i>Lasersko strukturiranje</i> .....	13
4.2.4.	<i>Izrada šupljina</i> .....	14
4.2.5.	<i>Lasersko zarezivanje</i> .....	15
4.2.6.	<i>Laser Contact Opening</i> .....	16
4.2.7.	<i>Laser Doped Selective Emitter</i> .....	17
4.2.8.	<i>Laser Direct Cleaving</i> .....	18
5.	Fokus-test na stroju LINEXO .....	20
5.1.	LINEXO .....	20
5.2.	Laser .....	21
5.3.	Obradak .....	25
5.4.	Izvođenje fokus-testa (korak 1,0 mm).....	26
5.5.	Izvođenje fokus-testa (korak 0,1 mm).....	28
6.	Rezultati i diskusija.....	30
6.1.	Analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 1,0$ mm .....	30
6.2.	Analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 0,1$ mm .....	31
6.3.	Druga analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 0,1$ mm.....	33
6.4.	Diskusija.....	36
7.	Zaključak.....	37
8.	Literatura.....	38
	Popis slika .....	39

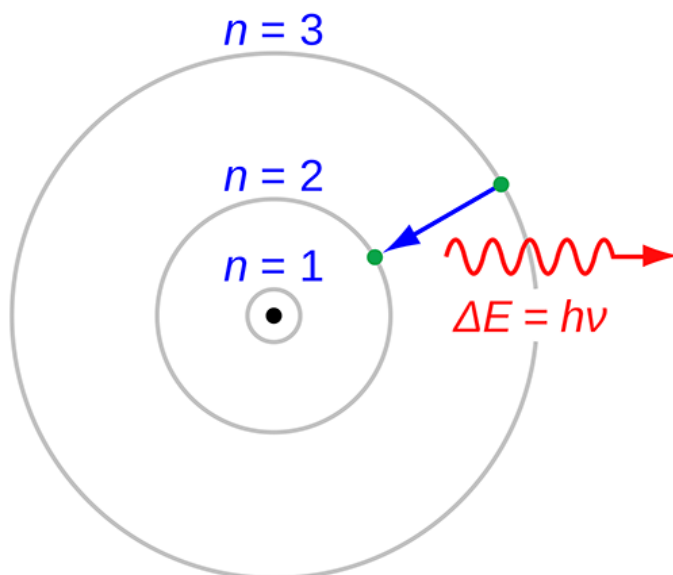


# 1. Uvod

Laser (eng. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ili pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane emisije zračenja) uređaj je koji stvara uski snop elektromagnetskog zračenja čija su glavna svojstva:

- monokromatičnost – emitirano elektromagnetsko zračenje je samo jedne valne duljine koja ovisi o razlici energija pobuđenog i osnovnog energetskeg stanja.
- usmjerenost – elektromagnetsko zračenje se emitira u jednom smjeru u vrlo uskom snopu malog promjera zahvaljujući brojnim refleksijama između dva zrcala koja omeđuju optički rezonator.
- koherentnost – fotoni laserske zrake svjetlosti imaju visoki stupanj koordinacije, jednakih su energija i usklađenih valnih svojstava, amplitude i faze što nije uočeno kod uobičajenih izvora svjetlosti koji emitiraju nekoherentnu svjetlost.
- velika gustoća snage i stabilnost snage – laserskim se zračenjem postižu najveće gustoće energije i snage po jedinici površine i prostornom kutu. [1]

Princip rada svakog lasera bazira se na kvantnom učinku stimulirane emisije zračenja. Temelj kvantne mehanike je Bohrov model atoma, prikazan na slici 1 [1].



Slika 1. Bohrov model atoma [2]

Elektroni u Bohrovom modelu atoma kruže oko jezgre po točno određenim kvantnim stanjima. Tada su u stacionarnom stanju, što znači da ne emitiraju energiju zračenjem. Elektron može s jednog stanja u drugo prijeći pod uvjetom da apsorbira odnosno emitira energiju.

Prijelaz iz višeg u niže energetske stanje rezultira emisijom elektromagnetskog zračenja koja može biti spontana ili stimulirana, a obje započinju apsorpcijom energije točno određene frekvencije odnosno valne duljine koja odgovara razlici energija pobuđenog i osnovnog stanja [1].

## 2. Princip rada lasera

### 2.1. Svjetlost i fotoni

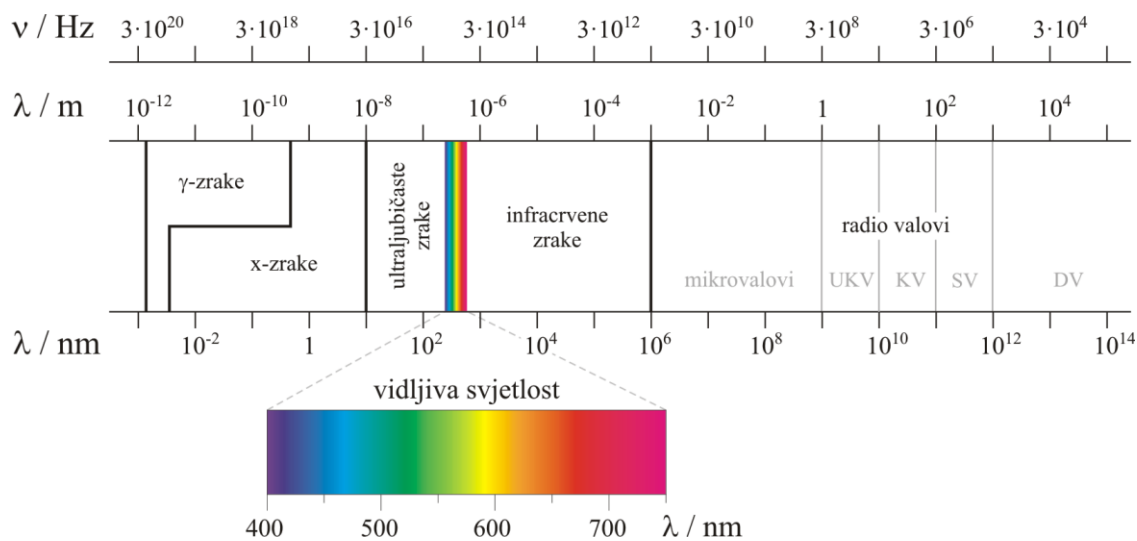
#### 2.1.1. Svjetlost

Svjetlost se može definirati kao elektromagnetski val, to jest periodična promjena električnog i magnetskog polja koja se širi prostorom [2]. Ta se definicija može izvući iz Maxwellovih istraživanja jer je njima dokazao da se energija svjetlosti prenosi kao oscilirajući električni i magnetski poremećaj koji se širi kroz prazan prostor.

#### 2.1.2. Fotoni

Fotoni su fundamentalne čestice bez mase koje se gibaju brzinom svjetlosti. Emisija fotona se prenosi u obliku impulsa elektromagnetskih valova. Prenošenjem energije s primarnih čestica na sekundarne nastaju valovi [3].

Poznato je da je posljedica zagrijanosti tijela emitiranje elektromagnetskog zračenja. Zračenje se pritom pojavljuje na visokim temperaturama u vidljivom dijelu spektra, a porastom temperature povećava se i udio plavog dijela spektra svjetla u ukupnom zračenju (slika 2). To je definirano Wienovim zakonom pomaka iz kojeg slijedi da se „s porastom temperature spektralno područje na kojem se nalazi maksimum zračenja pomiče prema kraćim valnim duljinama.“ [4]



Slika 2. Spektar zračenja [5]

Planckov zakon opisuje zračenje crnog tijela. Postulati zakona jesu sljedeći:

- 1) Energija elektromagnetskih oscilatora može se mijenjati samo za određeni, diskretni iznos odnosno u kvantima energije.
- 2) Energija oscilatora s frekvencijom  $\nu$  može se mijenjati samo za cjelobrojni iznos umnoška frekvencije i konstante  $h$ ,

$$\Delta E = n \cdot h \cdot \nu$$

gdje je  $n$  cijeli broj, a  $h$  Planckova konstanta [3].

Prema kvantnoj će predodžbi oscilator biti pobuđen samo u slučaju primanja energije minimalnog iznosa  $h \cdot \nu$ . Zbog te će činjenice visokofrekventni oscilatori ostati nepobuđeni, a veoma kratki valovi uopće neće emitirati. Iz navedenog proizlazi zaključak da je zračenje određene frekvencije poput skupine čestica energije  $h \cdot \nu$ . Te se čestice nazivaju fotoni [1]

## 2.2. Glavni procesi nastanka laserske svjetlosti

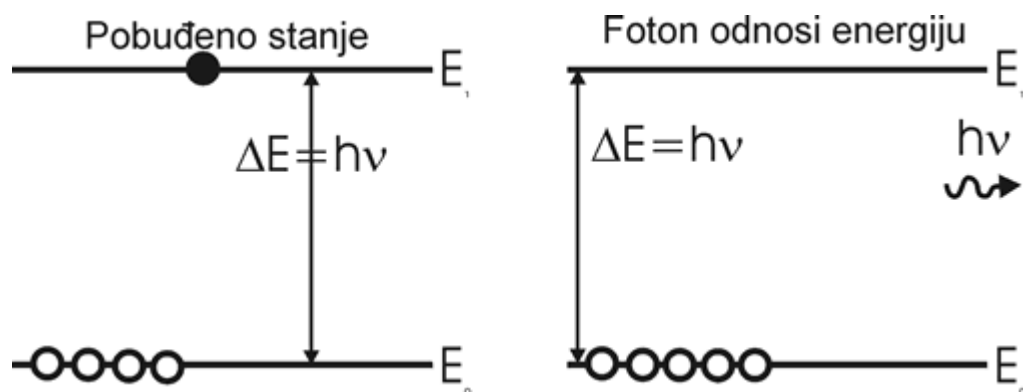
Posljedica neprestanog gibanja atoma je ta da se atomi mogu nalaziti u različitim stupnjevima pobuđenosti koje tako generiraju različite vrste energije (svjetlosnu, toplinsku, električnu, itd.). Nakon pobude, elektroni se vraćaju u svoje početno odnosno osnovno stanje i tijekom toga oslobađaju svjetlosne čestice koje se nazivaju fotoni. Svi se fotoni nalaze na istoj valnoj duljini i međusobno su koherentni. Drugim riječima, poklapaju im se frekvencija, faza i polarizacija.

Glavni su procesi nastanka laserske svjetlosti spontana emisija, stimulirana emisija i inverzija napučenosti.

Kad se na istom mjestu nalazi velik broj atoma s viškom energije (atomi koji su postigli inverziju napučenosti), ti atomi spontano emitiraju fotone u različitim smjerovima. Posljedica slanja fotona određene valne duljine i faze na navedene atome je da će fotoni djelovati na atom. Atom pritom ranije emitira fotone identične faze, valne duljine i smjera kretanja kao što imaju upadni fotoni. Tako se može definirati koherentno zračenje. Koherentno je zračenje posljedica stimulirane emisije, a obična je svjetlost posljedica spontane emisije. Takozvani „efekt lavine“ stvori se kad se više usmjerenih fotona kreće kroz pobuđene atome. Tako onda sve više koherentnih fotona putuje kroz medij [3].

### 2.2.1. Spontana emisija

Preduvjet za spontanu emisiju je prelazak atoma u pobuđeno stanje. To se događa kad atom apsorbira foton odgovarajuće valne duljine, a prilikom toga navedeni foton nestaje. Spontana je emisija osnova za apsorpciju i stimuliranu emisiju (slika 3). Prema Einsteinovim istraživanjima, atom se u stanju pobude nalazi izrazito kratko, a nakon toga spontano prelazi u stanje niže energije, emitirajući pritom foton. Energija fotona jednaka je razlici energija u pobuđenom i nižem energetskekom nivou. Takvo je zračenje nekoherentno i rezultira običnom svjetlošću [6].



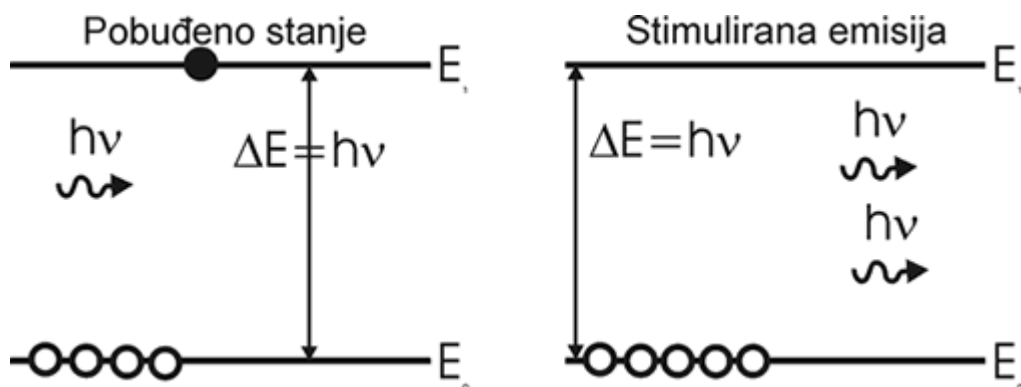
Slika 3. Spontana emisija [6]

### 2.2.2. Stimulirana emisija

Atomi iz osnovnog u pobuđeno stanje prelaze apsorpcijom. Pobuđeni se atom nastoji vratiti u niže energetske stanje što se naziva relaksacija. Taj atom emitira foton odnosno svjetlost. Ako foton dođe do atoma u pobuđenom stanju gdje energija odgovara energetskekoj razlici pobuđenog i osnovnog stanja, atom se vraća u stanje niže energije odnosno u osnovno stanje. Atom prilikom toga emitira foton sa istom valnom duljinom i fazom kao što ih ima upadni foton.

U mediju, u kojem se proces nastavlja, nalazi se zrcalo visoke reflektivnosti koje odbija gotovo sve koherentne fotone natrag u medij. Tako se pojačava svjetlost stimuliranom emisijom zračenja (slika 4) [6].



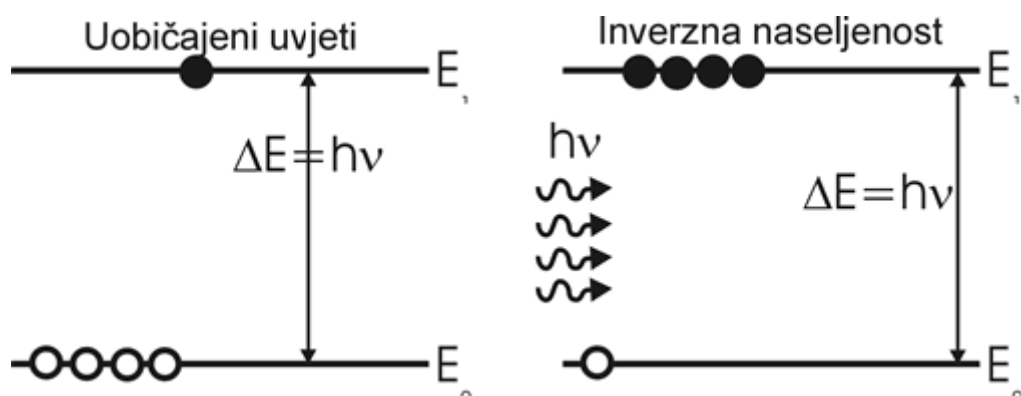


Slika 4. Stimulirana emisija [6]

Navedeno opisuje gibanje fotona kroz medij unaprijed i unazad. Budući da zbog stimulirane emisije svakim prolaskom broj fotona raste, takvo gibanje fotona rezultira velikim brojem fotona jednakih karakteristika. Zrcalo na kraju lasera je polureflektirajuće, dakle dio svjetlosti propušta, a dio emitira. Propuštena svjetlost naziva se laserska svjetlost. Snop svjetlosti koji tvori laser je pritom vrlo uzak i koncentriran. [6]

### 2.2.3. Inverzija napučenosti

Tek kada stimulirana emisija nadvlada spontanu emisiju i apsorpciju može se generirati laserska svjetlost. To se postiže inverzijom napučenosti atoma u radnom tijelu. Drugim riječima, veći se broj atoma mora nalaziti u pobuđenom stanju, nego u osnovnom (slika 5).



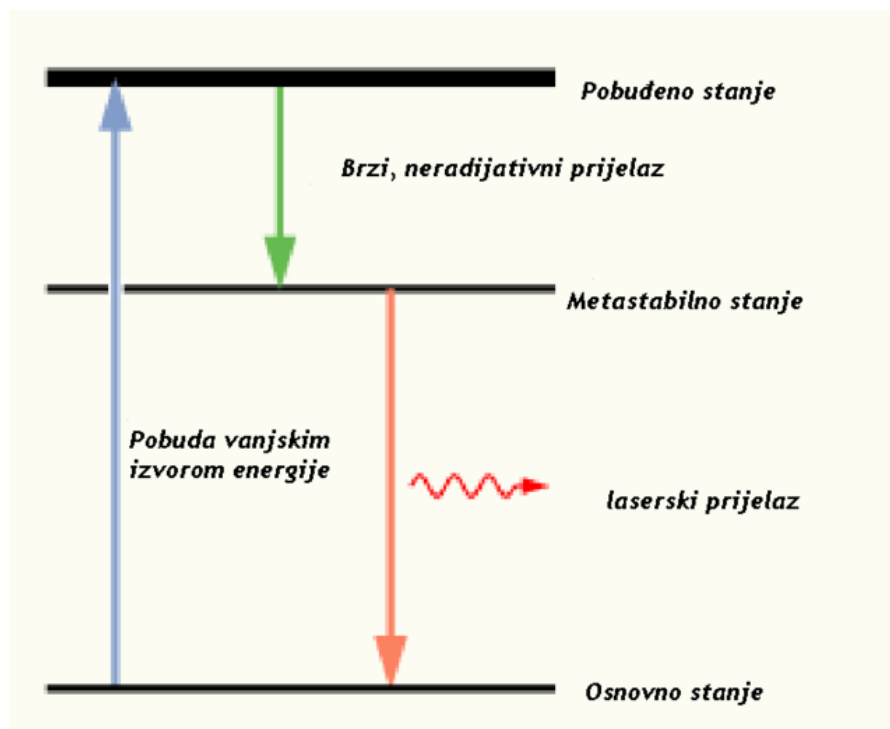
Slika 5. Inverzija napučenosti [6]

U realnim tvarima, atomi i molekule uvijek imaju više od dvije energetske razine. Inverzija napučenosti se u njima postiže smanjenjem napučenosti nižeg energetskeg stanja ili povećanjem napučenosti višeg energetskeg stanja. [6]

### 2.3. Uvjeti laserske emisije

Uvjeti koji omogućavaju lasersku emisiju elektromagnetskog zračenja su inverzija napučenosti gdje je broj atoma u pobuđenom stanju veći od onoga u osnovnom, ili otklanjanje fotona različitih usmjerenja i faza [1].

Kao što je već bilo navedeno pod točkom 2.2.3., uvjet za ostvarenje inverzije napučenosti je postojanje više od dva stanja energije u sustavu. Atomi se vanjskim izvorom energije (kemijske reakcije, električna struja) pobuđuju u najviše energetske stanje te izrazito velikom brzinom spontano relaksiraju u niže (metastabilno) stanje gdje se nalaze duže. Dakle, inverzija napučenosti se postiže između osnovnog i metastabilnog stanja. Kod relaksacije atoma iz metastabilnog u osnovno stanje dolazi do stimulirane emisije (slika 6).

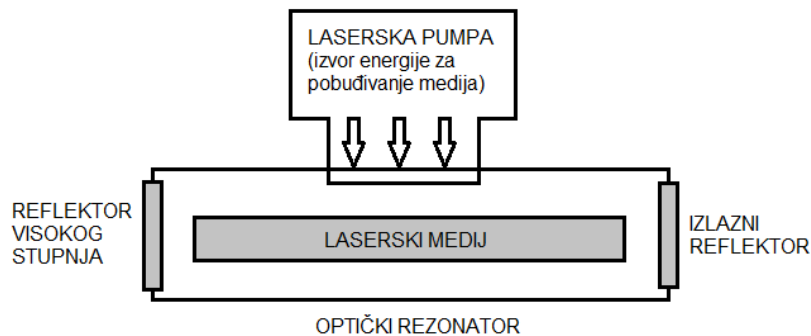


Slika 6. Inverzija napučenosti u sustavu s tri energetske razine [7]

Uvjet otklanjanja fotona različitih usmjerenja i faza ostvaruje se pomoću rezonatora (optičke šupljine). Rezonator je građen od dva paralelna ravna ili konkavna zrcala. Većina će atoma spontano emitirati elektromagnetsko zračenje prilikom čega inverzija napučenosti ne igra ulogu. Funkcija rezonatora je pritom otklanjanje fotona različitog usmjerenja te istovremeno vraćanje fotona željenog smjera u laserski medij i na taj način omogućavanje amplifikacije stimuliranom emisijom [1].

### 3. Građa lasera

Osnovni dijelovi koji čine građu lasera jesu: laserski (aktivni) medij (optičko pojačalo), optička (energetska, laserska) pumpa, zrcala (optički rezonator) i izlazna laserska zraka (slika 7).



Slika 7. Građa lasera [1]

#### 3.1. Laserski medij

Laserski odnosno aktivni medij ključan je faktor za određivanje na kojoj će valnoj duljini raditi laser. U njemu svakim prolaskom fotona dolazi do pojačanja laserske svjetlosti. Kao što je bilo navedeno pod točkom 2.3., djelovanjem vanjskog izvora energije stvara se inverzija napučenosti razina energije te pritom i spontana i stimulirana emisija fotona. Budući da je medij takav da njegova struktura sadrži metastabilne energetske razine, laserska se zraka formira lavinom stimuliranih emisija [1].

#### 3.2. Optička pumpa

Zadaća optičke pumpe je osiguravanje da laser ima potrebnu energiju za rad. Energija dolazi iz vanjskih izvora, primjerice kemijska reakcija, eksplozija ili bljeskalica.

Drugim riječima, optička je pumpa dio lasera koji predaje elektronima laserskog medija energiju da bi oni prešli u pobuđeno stanje [8]. Elektroni se, nakon kratkog provedenog vremena u pobuđenom stanju, relaksiraju i nakon toga nalaze u metastabilnom stanju. Budući da se elektroni sada nalaze na višem energetske nivou, nego na slobodnom nižem nivou, dolazi do inverzije napučenosti, čime se rad detaljnije bavi pod točkom 3.1.

### 3.3. Optički rezonator

Kao što je navedeno pod točkom 3.1., nakon pobuđivanja laserskog medija dolazi do inverzije napućenosti pa time do spontane i stimulirane emisije fotona. To u optičkom rezonatoru dovodi do optičke amplifikacije fotona određenih valnih svojstva pomoću oscilacija između dva paralelna zrcala što rezultira stvaranjem laserske svjetlosti. Optički rezonator izgleda kao cilindričan šuplji valjak koji sa svakog kraja ima dva paralelna, u najviše slučajeva konkavna zrcala određenog stupnja refleksije. Jedno je od tih zrcala gotovo potpuno reflektivno, a drugo je djelomično propusno. Djelomično propusno zrcalo naziva se izlazni reflektor i ono omogućuje stvaranje izlazne zrake svjetlosti. [1]

Optički rezonator kao najbitniji dio građe lasera zahtijeva izrazito preciznu i točnu konstrukciju. Osim transmisije i refleksije svjetlosti, kod konstruiranja optičkog rezonatora treba uzeti u obzir i raspršenje svjetlosti, apsorpciju, mehanička opterećenja i otpornost na njih jer svi navedeni faktori mogu veoma jako utjecati na valnu duljinu, fazu i usmjerenje elektromagnetskog zračenja.

## 4. Laserski procesi u strojarstvu

Laserski su procesi za razliku od konvencionalnih mehaničkih tehnoloških procesa ne samo ekonomičniji, već i precizniji i čišći. Laserski procesi ne generiraju prašinu prilikom obrade koji bi mogli kontaminirati obradak ili u krajnjem slučaju dovesti do škartnih komada. Korištenjem vrlo kratkih laserskih impulsa se također sprečava formiranje zona gdje je došlo do taljenja obratka, kako materijal vaporizira bez nakupljenih ostataka obrade. Plinovi koji nastaju isparivanjem se lako mogu ukloniti iz radne atmosfere.

Budući da su svi procesi beskontaktni i nema širenja vibracija, ne dolazi do mehaničkih opterećenja ili loma. Korištenjem prednosti koje pruža laserska tehnologija reducira se i potrebni radni materijal. Jedan je od razloga između ostalih taj što sam program putanje lasera omogućava da nije potrebno dodavati materijal zbog promjene smjera obrade, a također je potreban dodatak za obradu minimalan.

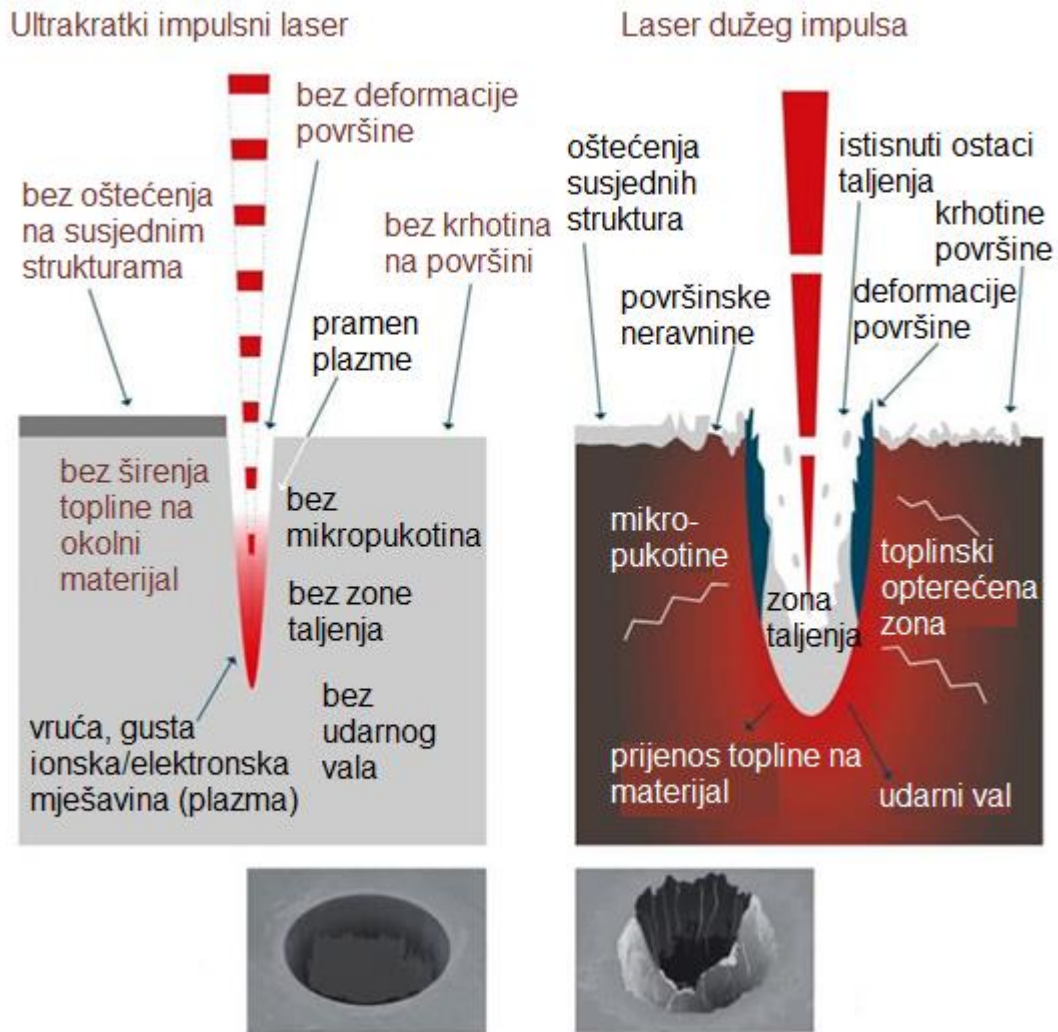
Korištenjem lasera omogućena je obrada gotovo svih vrsta materijala zbog široke podesivosti i fleksibilnosti. Kompleksne konture se također veoma laku izrađuju. Može se dodati da zbog samog laserskog snopa u obradi, bez konvencionalnog alata koji bi se mogao istrošiti ili polomiti poput, primjerice, tokarskog noža, ponovljivost je procesa s jednakom kvalitetom i istim parametrima obrade garantirana.

Osim u strojarstvu laseri se također koriste u telekomunikaciji i laserskoj tehnologiji (DVD, Blu-Ray, laserski pisači), u medicini i stomatologiji (laserske operacije, lasersko uklanjanje dioptrije, estetski zahvati, uklanjanje zubnih naslaga, izbjeljivanje zubi), u dermatologiji i kozmetici (korigiranje ožiljaka, uklanjanje tetovaža) i u mnogim drugim granama [7].

### 4.1. Ultrakratki impulsni laser

Ultrakratki impulsni laser (UKP laser) koristi laserske impulse koji su osobito kratki naspram ostalih tehnologija kao što je to slučaj kod CO<sub>2</sub> lasera. Navedeni se impulsi kreću u rasponu od nekoliko piko- ili femtosekunda. Takvi ekstremno kratki impulsi osiguravaju uklanjanje slojeva materijala obratka isparivanjem bez nakupljanja ostataka obrade, a i ne dolazi do karbonizacije na obratku. Time se realizira izrazito čisti rezni rub.

Ultrakratki su laserski impulsi pritom pogotovo povoljni za industriju mikročipova i sličnih elektroničkih uređaja zbog lokalizacije inputa energije. Duži laserski impulsi mogu prouzrokovati oštećenja u površini obratka (kao npr. zbog taljenja materijala jer nastaje zona visoke temperature), a i oštećenja unutar samog materijala kao što su mikrozarezi i tlačni udari koji se šire kroz materijal (slika 8) [9].



Slika 8. Ultrakratki impulsni laser [9]

## 4.2. Tehnologije obrade laserom

### 4.2.1. Depaneliranje

Zbog razvoja sve manjih električnih uređaja, smanjuje se i veličina potrebnih tiskanih pločica. Unatoč tome, razina funkcionalnosti sve više raste. Time je znatno otežana proizvodnja pločica. Da bi se olakšala proizvodnja, veći se broj pločica proizvodi i sastavlja na takozvanom panelu. Depaneliranje je dakle proces odvajanja pojedinih pločica s panela.

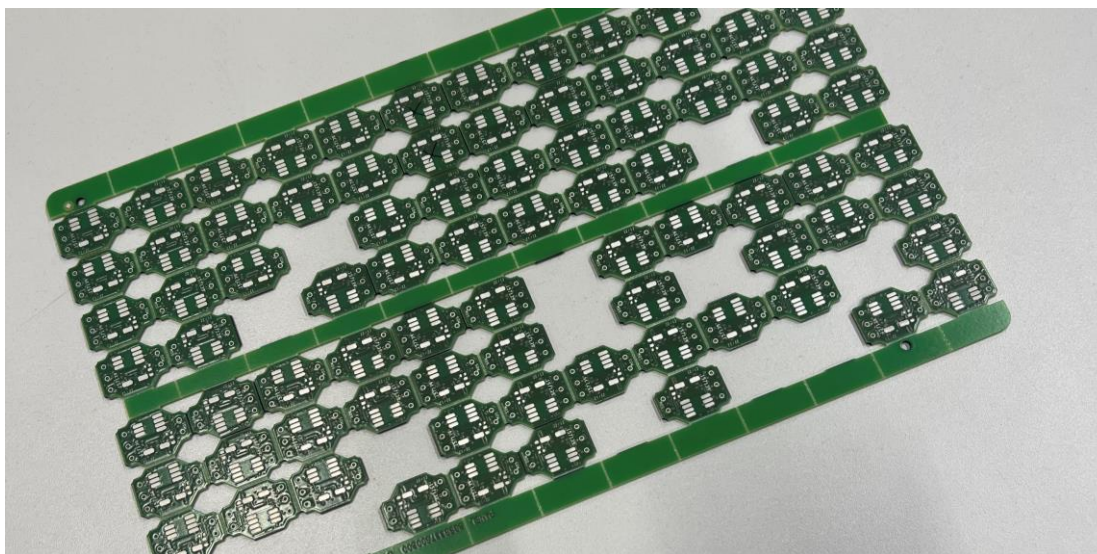
Rezanje PCB panela vrši se usmjerenim laserskim snopom koji direktno isparava materijal sloj po sloj. U tom procesu korištenje lasera omogućava jednostavno podešavanje kontura. Plinovi koji

se stvaraju kod odvajanja su ekstrahirani, što rezultira završnim proizvodom bez naslaga ili ostataka.

Prednost laserskog depaneliranja je u potpunosti čisti rezni rub bez ostataka, prašine (zahvaljujući isparivanju materijala) i pougljenjivanja. Može se koristiti za gotovo svaki materijal.

Budući da nije potreban dodatni prostor za preusmjerenje laserskog snopa, štedi se na materijalu u procesu. Zahvaljujući termičkoj ablaciji, zone pod utjecajem topline su minimalne. Rezovi su također visoke preciznosti, točnosti do 5  $\mu\text{m}$ . Kako se radi o beskontaktnom odvajanju bez vibracija, nema napreznja u zoni rezanja, a tako ni oštećenja materijala. [9]

Na slici 9 nalazi se primjer panele.



*Slika 9. Depaneliranje*

#### **4.2.2. Lasersko bušenje**

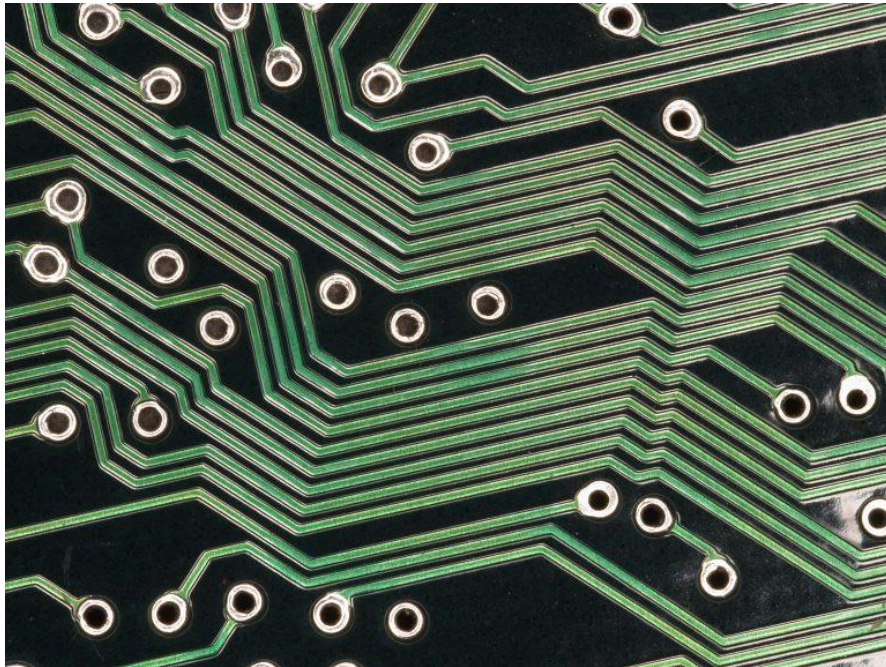
Kod laserskog bušenja ultrakratki laserski impulsi visoke snage djeluju na materijal. Ovisno o trajanju impulsa, materijal se tali, isparava ili ionizira. Veće snage pritom znače jaču ablaciju materijala. Kraće trajanje impulsa znatno smanjuje toplinsko opterećenje obratka.

Tijekom ablacije volumen se materijala u zoni bušenja znatno povećava što rezultira visokim tlakom. Taj tlak istiskuje materijal van zone bušenja u vrlo kratkom vremenu bez ostataka i naslaga.

Prednosti u odnosu na konvencionalno strojno bušenje su radna zona bez strugotine koja može onečistiti radni prostor ili čak oštetiti obradak, rez koji nije ovisan o promjeru bušilice te sigurnost da ne može doći do oštećenja obratka lomom bušilice. Lasersko bušenje također štedi na vremenu

jer nije potrebno mijenjati alat. Budući da je proces beskontaktni, nema termičkog ili mehaničkog naprezanja u materijalu. Kako nema zona koje su pod utjecajem topline, nije potrebno dovođenje sredstva za hlađenje. [9]

Na slici 10 vidljiv je primjer obratka nakon laserskog bušenja.



*Slika 10. Lasersko bušenje [9]*

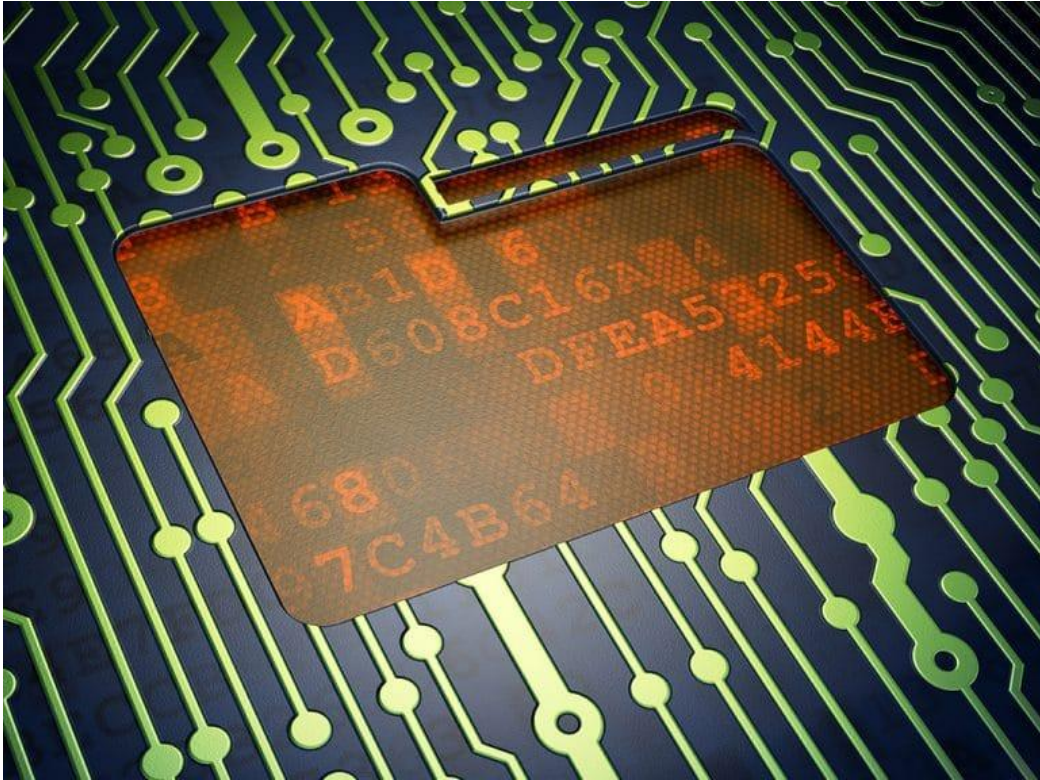
### **4.2.3. Lasersko strukturiranje**

Lasersko strukturiranje beskontaktni je postupak u kojem pulsirajući laserski snop kratkotrajno i lokalno djeluje na materijal da bi se on zagrijavao do toliko visokih temperatura da površinski slojevi isparavaju. Koristi se za definiranje elektronskih tragova na površini proizvoda. Time je omogućena izrada kompleksnih i fleksibilnih geometrijskih oblika i dizajna bez potrebe konvencionalnih proizvodnih alata.

Prednosti laserskog strukturiranja su primjerice minimalna oštećenja na donjem materijalu kod bakrenog sloja na tiskanim pločicama, visoka preciznost, širok spektar materijala obrade, smanjen broj koraka izrade i beskonačno mnogo mogućnosti dizajna. [9]

Na slici 11 se vide mogućnosti laserskog strukturiranja.





*Slika 11. Lasersko strukturiranje [9]*

#### **4.2.4. Izrada šupljina**

Šupljine na obratku su male rupe koje omogućavaju akomodaciju komponenata u unutarnjim slojevima tiskanih ploča, a time se postiže smještanje veoma složenih sklopova u mali prostor. Maksimalno se iskorištenje prostora može realizirati kreiranjem više slojeva, tzv. „multilayera“.

Da bi se mikročipovi, otpornici i ostale komponente mogle smjestiti unutar tiskane pločice, laserima se rade šupljine na površini pločice, uklanjanjem viška materijala. Laser to radi tako da prvo otvara bakreni sloj i uklanja dielektrik. Ponovnim se prolaskom lasera čisti otvorena struktura unutarnje bakrene površine od ostataka smole.

Ne samo da je proces precizniji od konvencionalnog načina izrade kavitacija, već je i ekonomičniji. Tijekom proizvodnje troškovi se smanjuju samom točnošću lasera, čime se smanjuje i broj potrebnih dijelova eliminacijom škartnih komada. Također, kod lasera ne dolazi do istrošenosti alata, što znači da ne dolazi do vremenskih ili finansijskih troškova prilikom zamjene alata. [9]

Na slici 12 prikazan je primjer obratka gdje je dizajn napravljen šupljinama.

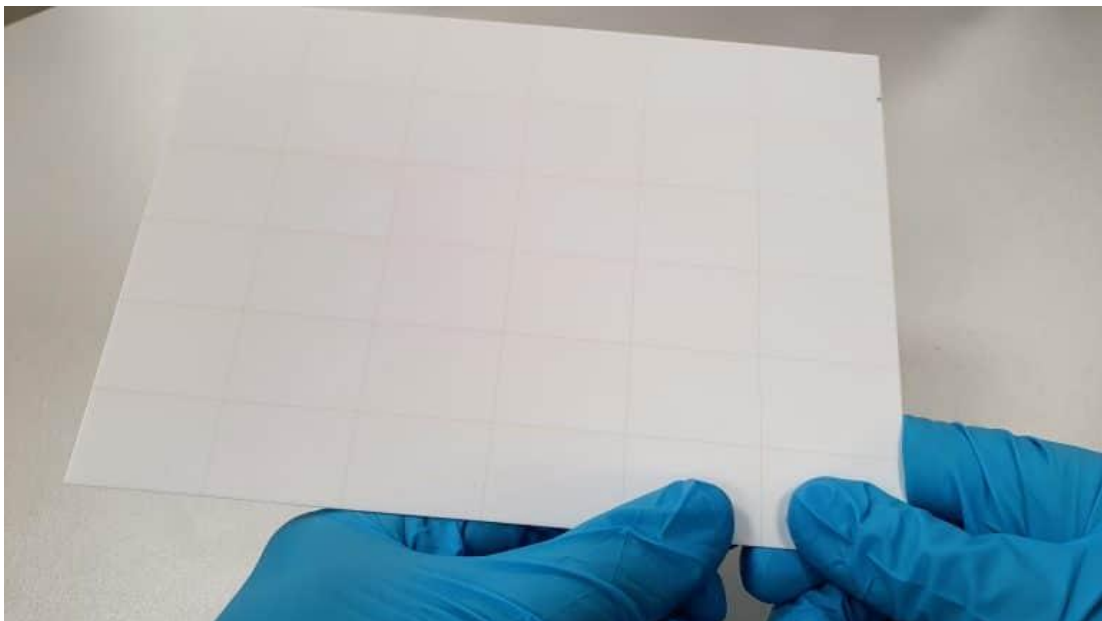


*Slika 12. Izrada šupljina [9]*

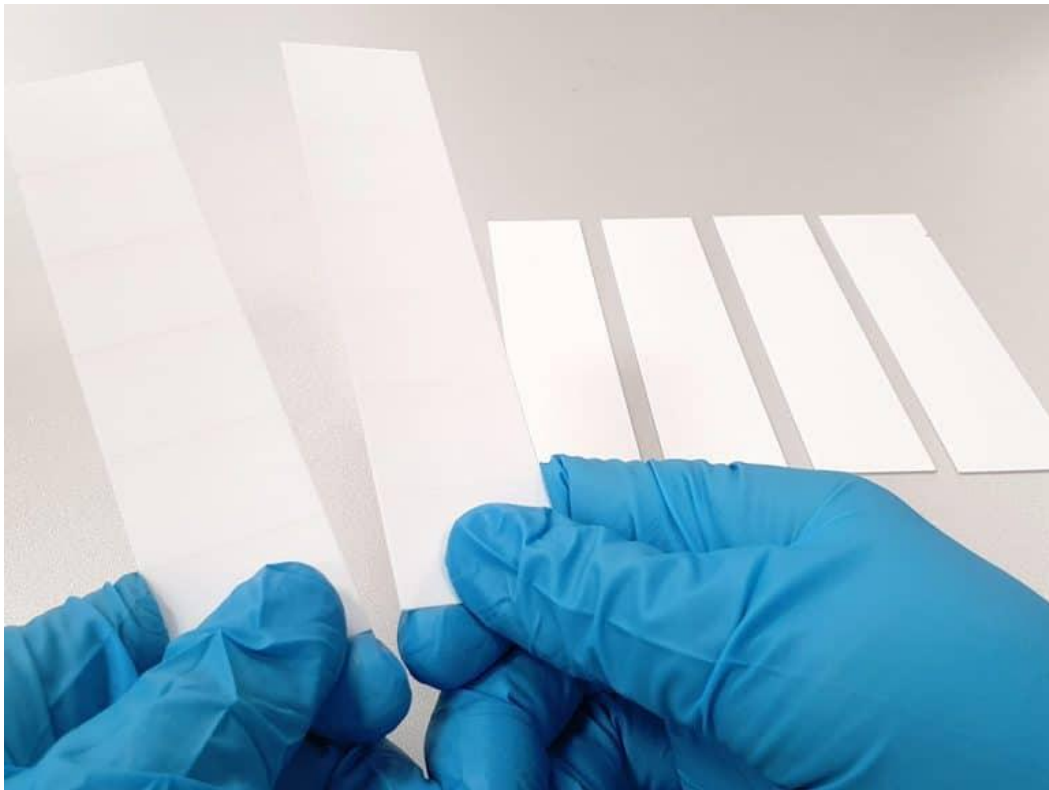
#### **4.2.5. Lasersko zarezivanje**

Lasersko je zarezivanje proces koji se koristi za prethodno odvajanje tiskanih pločica. Predeterminirane točke loma se pritom kreiraju na rubovima panela tako da bi se kasnije mogle lakše i brže slomiti duž navedenih točaka. [9]

Primjer laserskog zarezivanja prikazan je na slikama 13 i 14.



*Slika 13. Obradak laserskog zarezivanja [9]*



*Slika 14. Lasersko zarezivanje [9]*

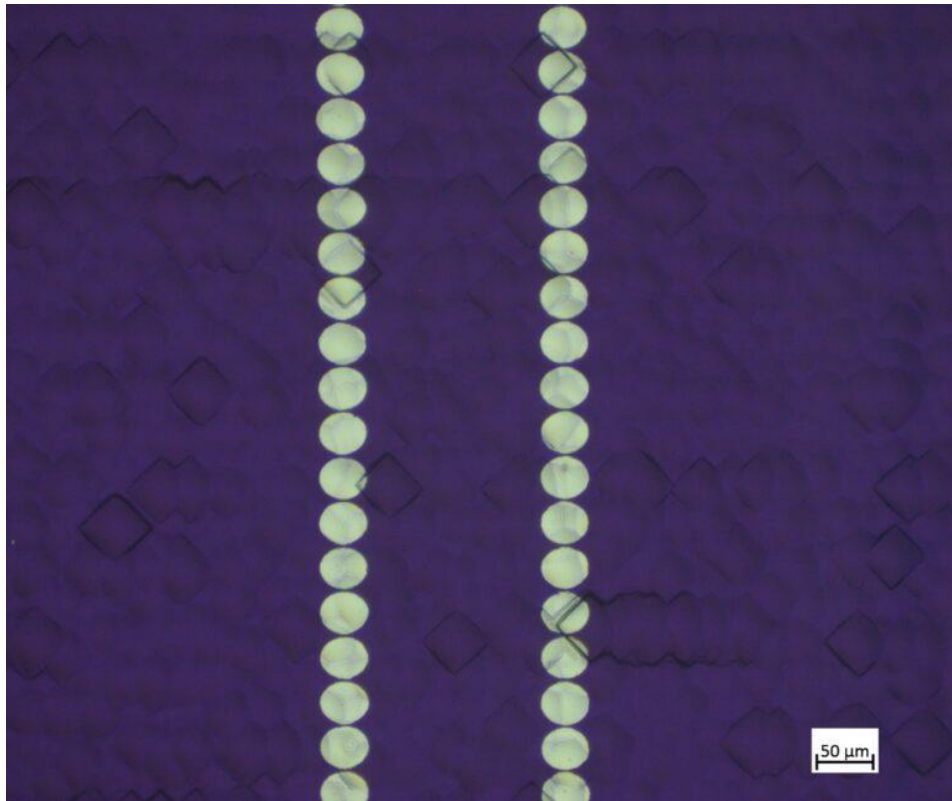
#### **4.2.6. Laser Contact Opening**

Takozvani Laser Contact Opening (LCO) proces je bitan korak u izradi IBC i PERC ćelija. Stvara kontaktne otvore u stražnjem sloju pasivizacije kroz lasersku ablaciju. Fokus je na selektivnom uklanjanju slojeva pasivizacije kroz crtkane, točkaste ili linijske uzorke.

Konvencionalne su metode otvaranja stražnje strane ćelije mehaničko zarezivanje ili mokro kemijsko jetkanje. Obje su navedene metode manje pogodne u pogledima brzine i škarta. Visoka kontaminacija obratka kod mokrog jetkanja nije praktična. Time je laserski proces idealan za selektivno, beskontaktno uklanjanje površinskog sloja.

IBC solarne ćelije imaju isprepletene metalne kontakte na stražnjoj površini u četkastom uzorku. Također isprepleteni ispod kontakata jesu emiteri i Back Surface Field područja. Izazovi u izradi takve strukture ćelije su definiranje područja N i P tipa na stražnjoj strani bez pojave kratkog spoja kad se te dvije regije odvojeno povezuju. [9]

Mikroskopski je prikaz LCO prikazan slikom 15.



*Slika 15. LCO [9]*

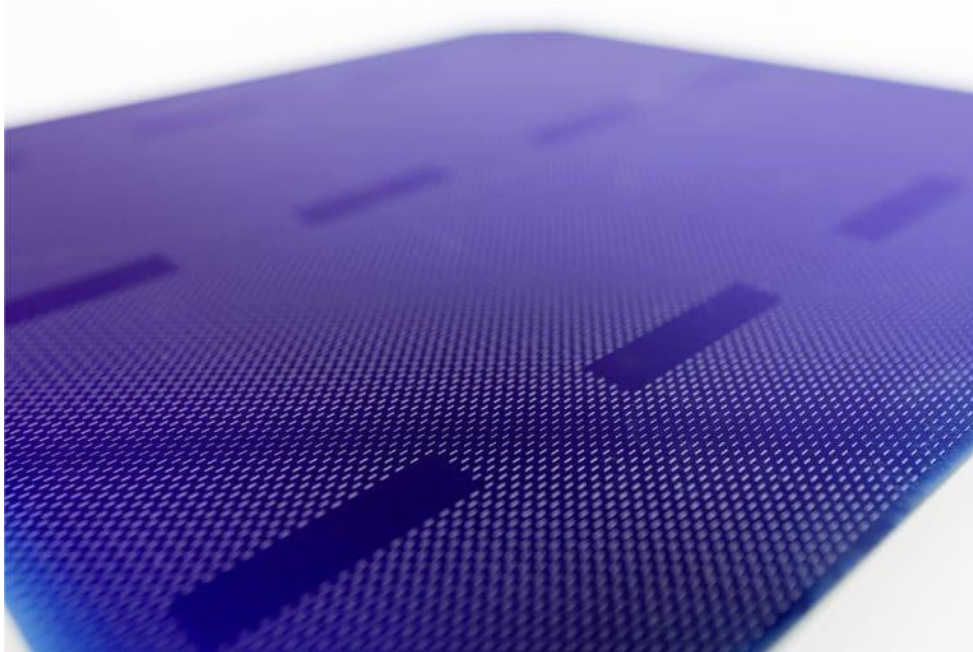
#### **4.2.7. Laser Doped Selective Emitter**

Da bi se dodatno povećala konverzija energetske učinkovitosti silikonskih ćelija s emiterom dopiranog borom ili fosforom, rekombinacija nosača naboja mora biti smanjena. Ne samo da je rekombinacija nosača naboja u fotoaktivnoj (nemetaliziranoj) regiji relevantna, već je i relevantna kod metalnih kontakata. Zahtjevi za profil dopiranja da bi se postigla niža rekombinacija nosača naboja je u tim dvjema domenama potpuno različita.

U usporedbi sa ostalim procesima jetkanja, laser omogućava slobodnu programibilnost geometrije gdje se uvode primjese. Nadalje, lasersko procesuiranje smanjuje troškove jer se kompleksni i skupi mokri kemijski procesi mogu izbjeći.

Jače uvođenje primjesa odnosno dopiranje postiže se slanjem dodatnih borovih ili fosfornih atoma s borosilikatnog ili fosfosilikatnog sloja stakla stvorenih bornom ili fosfornom difuzijom pomoću laserske difuzije. [9]

LDSE proces prikazan je na slici 16.



*Slika 16. LDSE [9]*

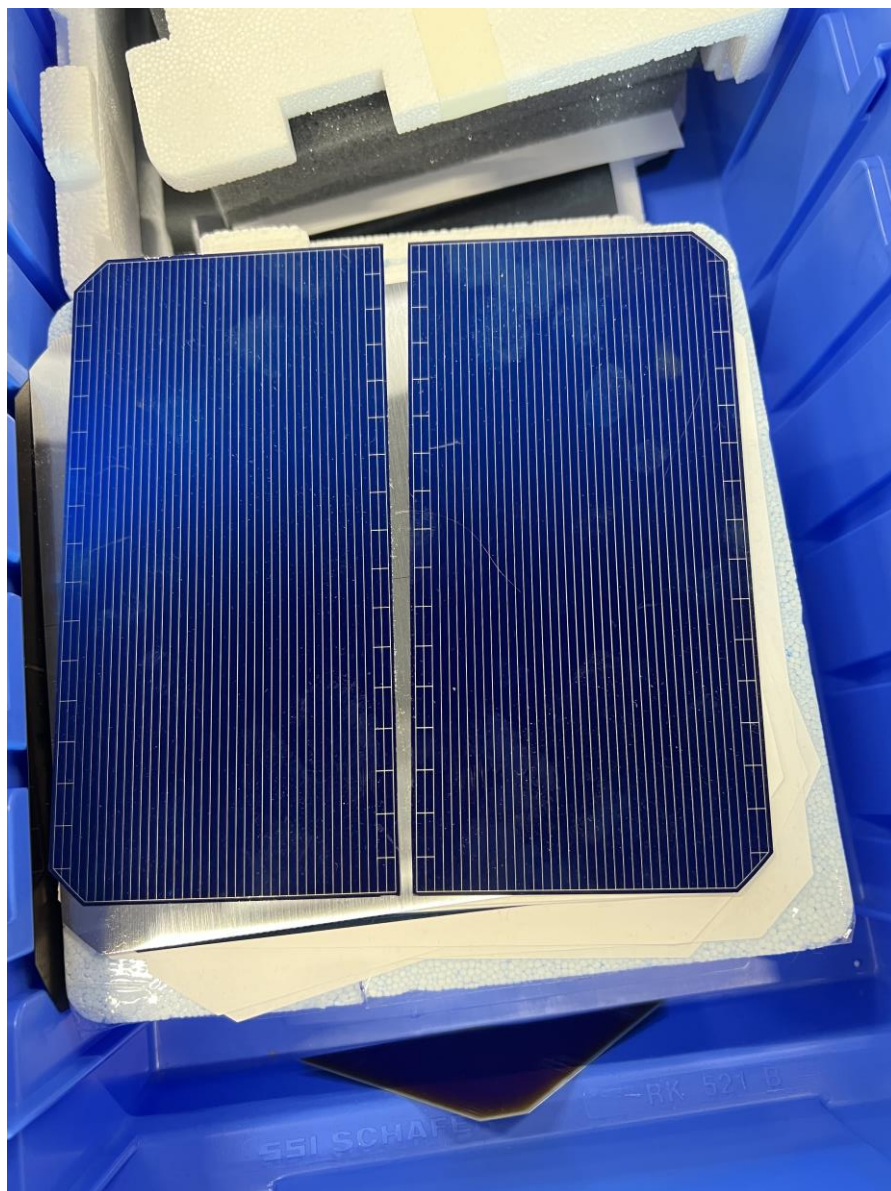
#### **4.2.8. Laser Direct Cleaving**

Primjer inovativne tehnologije rezanja ćelija je Laser Direct Cleaving (LDC) koju je patentirala firma InnoLas Solutions. Može se definirati kao termički proces separacije koji je vođen laserskim snopom i direktan je postupak stvaranja otvora.

U odnosu na ablativno zarezivanje u tradicionalnom „Scribe and Break“ procesu, laser kod LDC-a preuzima vođenje lomnog ruba. Lokalno inducirani napon laserskog snopa pritom omogućava vođenje po slobodno definiranoj liniji do suprotnog kraja ćelije. Solarna ćelija se tako lomi isključivo naponom generiranim laserskim snopom. Ne samo da je to rješenje osobito nježno, već i eliminira potrebu za dodatnim medijem za hlađenje i ispiranje.

Prednosti su velike brzine, operacija bez stvaranja čestica i nije potrebna mehanička separacija. Također je spriječeno stvaranje mikropukotina i smanjen broj lomova ćelija. Uzimajući u obzir ekonomičnost, financijski je isplativo rješenje i štedi se na vremenu. [9]

Na slici 17 je prikazan obradak izrađen LDC-om.



*Slika 17. LDC*

## 5. Fokus-test na stroju LINEXO

U sklopu praktičnog dijela završnog rada izveo se fokus-test na stroju LINEXO.

Fokus-test važan je test koji se mora provesti prije kalibracije. Daje informaciju o tome na kojoj se udaljenosti objektiv mora nalaziti od obratka da bi laserska zraka bila paralelna, ili drugim riječima, u fokusu. U fokus-poziciji laserska zraka je paralelna i samim time najtočnija u obradi jer je tamo laserska zraka najtanja.

Budući da laserska zraka u svojoj putanji prolazi kroz tzv. *Beam Expander* koji dvostruko povećava promjer laserske zrake, ona mijenja svoj položaj i više nije paralelna. Zbog toga je potrebno pronaći točnu udaljenost od obratka - *wafera* (definirano pod točkom 5.3.) da zraka bude minimalna.

Laserska zraka pritom na različitim udaljenostima od z-osi obrađuje obradak tako da buši male rupice na obratku. Bitno je pronaći poziciju gdje laserska zraka uklanja najmanje materijala. U toj poziciji su rupice najtočnije dok su van fokusa rupice veće i u obliku elipse.

### 5.1. LINEXO

LINEXO, prikazan slikom 18, višenamjenska je obradna stanica dizajnirana za primjenu u elektroničkoj, preciznoj i fotonaponskoj industriji. Koristi se najčešće u istraživanju i razvoju, a i u proizvodnji manjih supstrata, kao što su keramički PCB-i.



Slika 18. LINEXO [9]

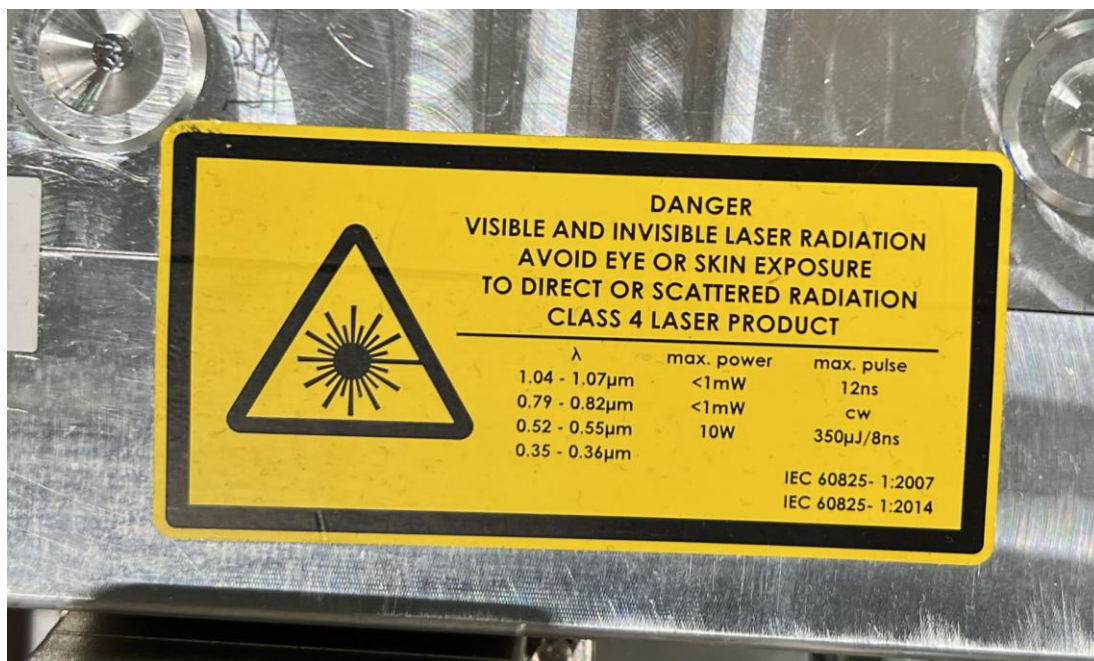
Osi stroja pokreću se linearnim motorima. Visoke brzine, kao i dobra dinamika osi rezultat su precizne tehnologije stroja. Preciznost i točnost sustava omogućuju staklene skale visoke rezolucije koje se koriste kao mjerni sustav svake osi.

LINEXO omogućava do tri laserska izvora s prilagodljivim izmjenama zrake. Tako stroj ima mogućnost izrade vrlo fleksibilnih dizajna s najvišim stupnjem prilagodbe za različite primjene, kao što je potrebno u laserskom bušenju, depaneliranju, fuzijskom rezanju, laserskoj ablaciji i slično. Prednosti stroja su i automatska kalibracija kamere, automatski sustav za poravnavanje i skaliranje, automatske rutinske radnje za provjeru sustava i slično.

Nekoliko tehničkih podataka o stroju su troosno upravljanje, preciznost od 5  $\mu\text{m}$ , ponovljivost od 2  $\mu\text{m}$ , površinu supstrata od 457 x 610 mm, mogućnost obrade PCB-a, keramike, silikona i metala te postolje od granita [9].

## 5.2. Laser

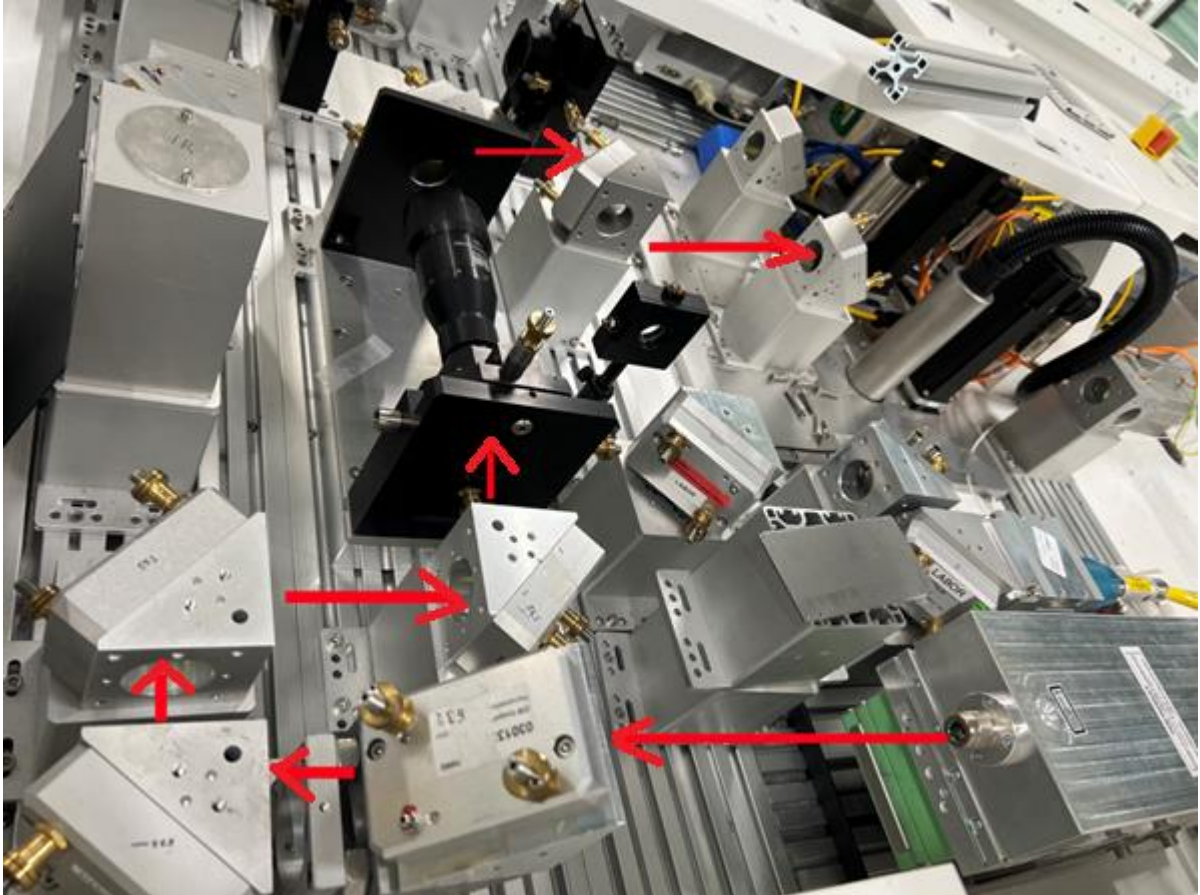
U svrhu izvođenja eksperimenta koristio se laser maksimalne snage 10 W koji emitira pulsirajuću zelenu lasersku zraku valne duljine od 532 nm. Pritom maksimalni impuls traje 12 ns. Tehnički podaci lasera prikazani su na slici.



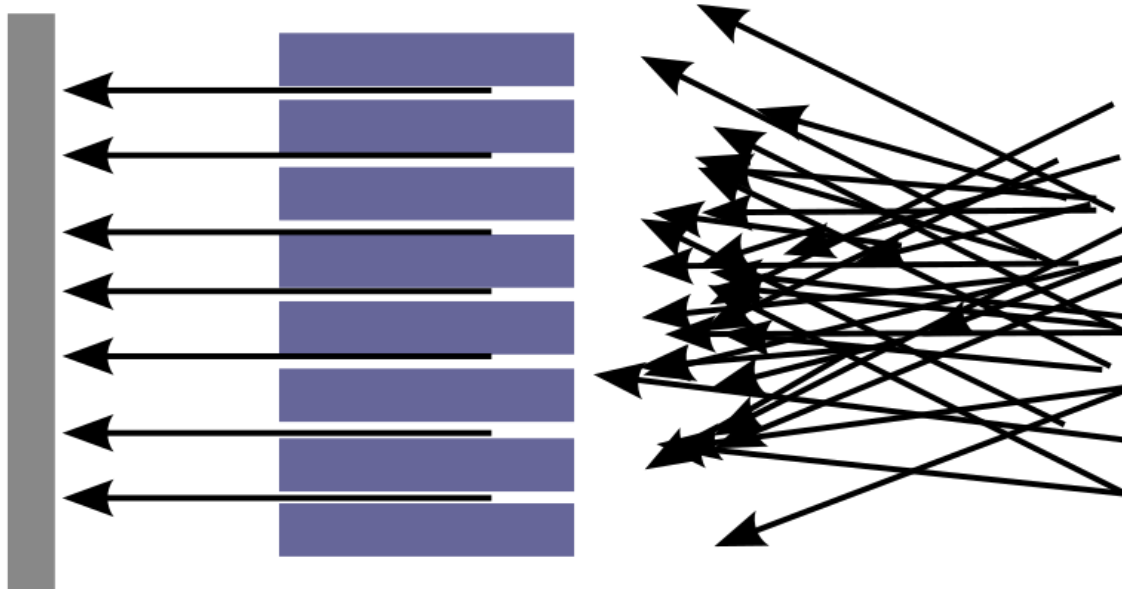
Slika 19. Tehnički podaci lasera



Na slici 20 je prikazana putanja laserske zrake. Nakon prolaska kroz nekoliko zrcala, laserska zraka putuje u tzv. *Beam Expander* odnosno povećavalo laserske zrake. Kod *Beam Expandera* također se nalazi kolimator laserske zrake koji laserske zrake čini paralelnima (slika 21). Nakon toga povećana i paralelna laserska zraka prolazi kroz zrcalo koje propušta zelenu svjetlost, a zatim u skener.



Slika 20. Putanja laserske zrake

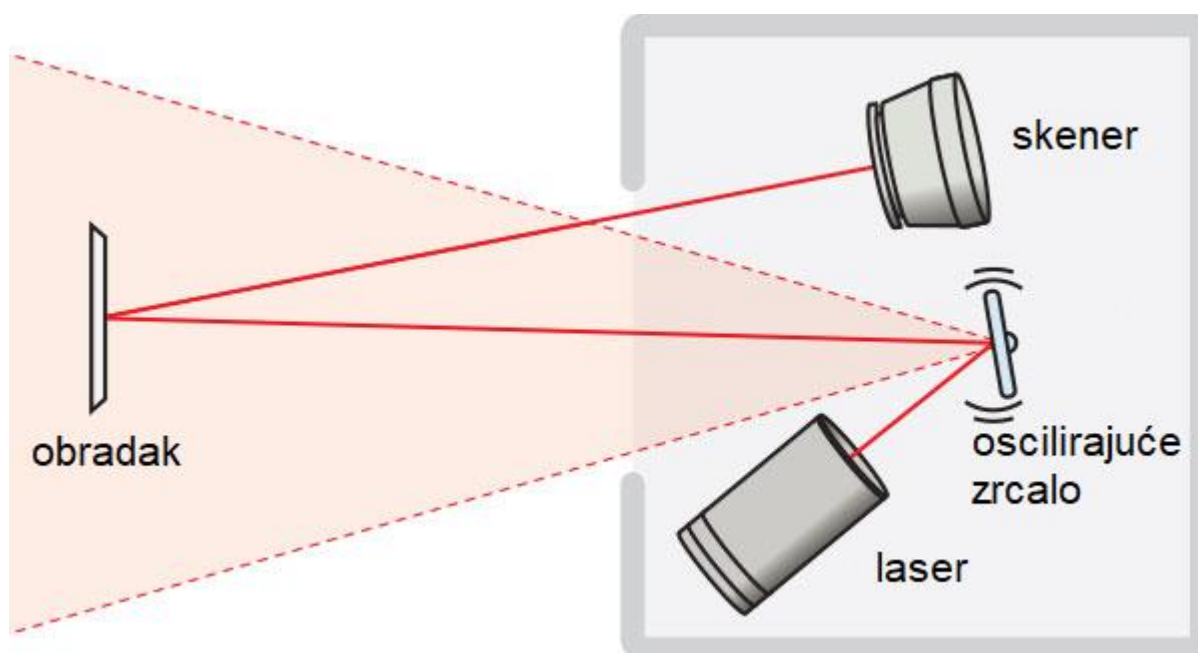


*Slika 21. Kolimacija laserskih zraka [10]*

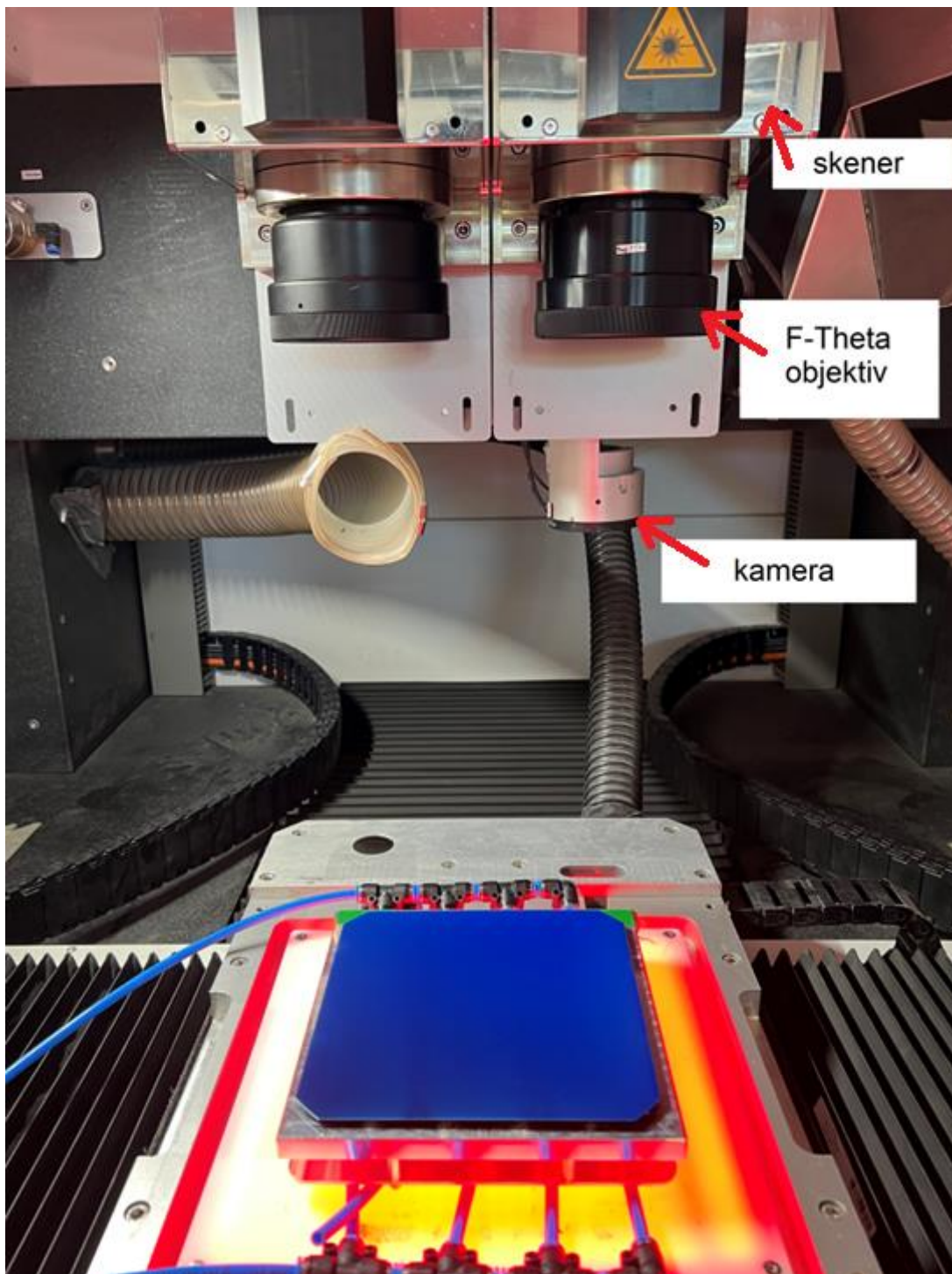
Na slici 24 prikazani su dijelovi kroz koje prolazi laser u radnoj komori. U skeneru se nalaze dva zrcala koja se međusobno gibaju velikim brzinama čime su u mogućnosti propustiti i usmjeriti lasersku zraku (slike 22 i 23), a skener pritom čita odgovarajuće podatke s obratka. Nakon skenera laserska zraka prolazi kroz F-Theta objektiv. F-Theta objektivni dizajnirani su s ciljem usmjeravanja laserske zrake na ravnu podlogu, dok standardne leće fokusiraju lasersku zraku na sferičnu površinu. Prednost F-Theta objektivna je konstantna veličina točke na koju pada laserska zraka, kamo god se zraka na radnoj površini usmjerila. Kamera u komori služi za praćenje procesa obrade, ali prije toga i za prepoznavanje rubova obratka. Na rubovima obično postoje oznake prema kojima kamera može prepoznati poziciju obratka na radnom stolu. Time je namještanje obratka automatizirano te stroj uz pomoć kamere može sam prepoznati na kojim je mjestima potrebno obrađivati.



Slika 22. Zrcala



Slika 23. Oscilirajuće zrcalo [11]



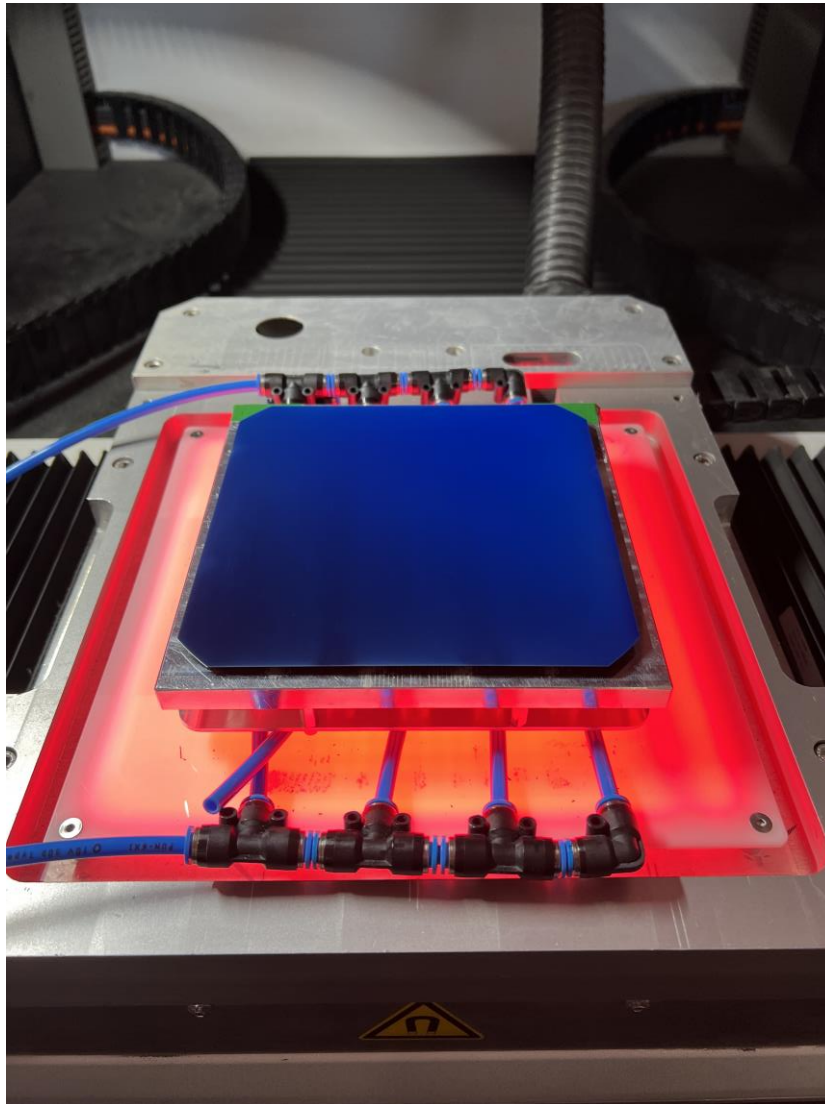
*Slika 24. Dijelovi u radnoj komori*

### **5.3. Obradak**

Za izvođenje fokus-testa koristi se silicijski *wafer* kao obradak (slika 25). *Wafer* je tanka ploča poluvodiča koja se koristi u proizvodnji integriranih sklopova i u poluvodičkoj industriji u

proizvodnji solarnih ploča. *Wafer* služi kao supstrat za mikroelektroničke uređaje ugrađene na *wafer*. [12]

Obradak - *wafer* ima silicij-nitridni premaz. Plavi je pritom sloj antirefleksivni jer on u zelenom području apsorbira najviše Sunčeve emisije.



*Slika 25. Obradak - wafer*

#### **5.4. Izvođenje fokus-testa (korak 1,0 mm)**

Prvi se fokus-test izvodi s korakom po z-osi od  $\Delta z = 1,0$  mm. To znači da se za svaku povučenu liniju skener s objektivom pomakne za 1,0 mm prema gore. Pri tom razmaku sam fokus-test nije toliko precizan, jer se radi o velikom koraku i postoji limit do kojeg skener može doći u radnom području zbog konstrukcijskih ograničenja.

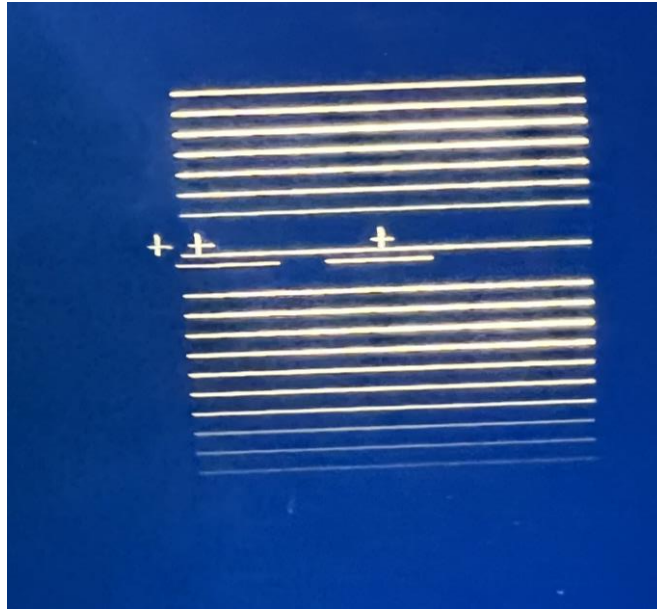
Na računalo stroja postavlja se opcija *Focus-Test* te odabire korak od 1,0 mm po z-osi. Također se podesi frekvencija lasera na 30 kHz, razmak impulsa 100  $\mu\text{m}$  te brzina od 3 m/s. U općim postavkama postavi se snaga na 80%.

Kreće se s iskustvenim podatkom koji kaže da je F-Theta objektiv udaljen 33 cm od obratka - *wafera*.

Nakon pokretanja skener se pomiče po z-osi i iscrtava linije na obratku - *waferu* (slika 26). Fokus-pozicija je pritom okom vidljiva jer je između njezine linije i ostalih linija veći razmak nego što je među linijama van fokus-pozicije, kao što je vidljivo na slici 27.



Slika 26. Fokus-test u tijeku



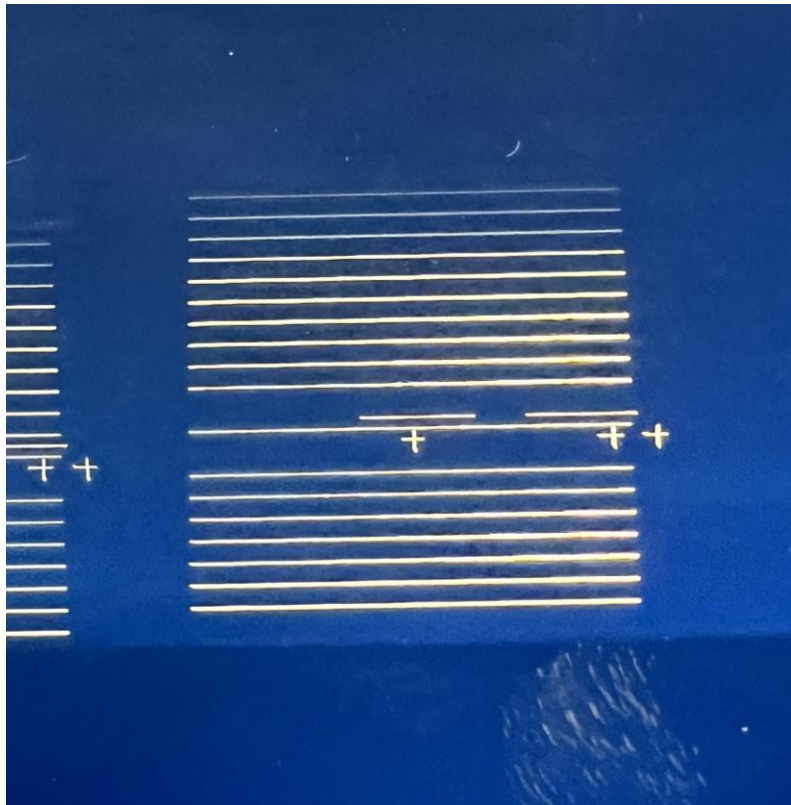
*Slika 27. Fokus-test na obratku - waferu*

### **5.5. Izvođenje fokus-testa (korak 0,1 mm)**

Za preciznije određivanje fokus-pozicije potrebno je izvesti test s manjim korakom da bi se bolje moglo utvrditi je li pozicija zaista u fokusu. Na manjim udaljenostima pokriva se mnogo manji razmak te je moguće na razini nanometra utvrditi koliko pretpostavljena fokus-pozicija odstupa od one pretpostavljene testom izvedenim većim korakom.

Za ovaj se fokus-test koristi korak od  $\Delta z = 0,1$  mm, a ostali podaci ostaju isti: frekvencija 30 kHz, razmak impulsa  $100 \mu\text{m}$  te brzina 3 m/s.

Na slici 28 prikazan je opisani fokus-test.



*Slika 28. Fokus-test na obratku - waferu*



## 6. Rezultati i diskusija

### 6.1. Analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 1,0$ mm

Nakon izvedenog fokus-testa prvo se obradak - *wafers* analizira prostim okom. Provjerom se utvrđuje da je test dobro izveden.

Poslije provjere prostim okom obradak - *wafers* se postavlja ispod mikroskopa gdje se precizno može utvrditi je li test bio uspješan. Ispod mikroskopa provjerava se jesu li u fokus-poziciji izbušeni kružići okruglog oblika. U suprotnom, ako su ovalnog oblika, fokus-pozicija nije dobro određena i laserska zraka nije fokusirana.

Na slici 29 vidljiva je fokus-pozicija ispod mikroskopa. Uočava se da su kružići dobrog oblika te da je fokus-pozicija od 33 cm udaljenosti objektiva od obratka - *wafers* postavljena ispravno. Na slici 30 prikazana je linija izvan fokus-pozicije na kojoj se može usporediti oblik kružića u odnosu na onaj u fokusu. Vidljivo je da su kružići ovalnog oblika i da se znatno razlikuju od onih u fokusu pa je moguće ustanoviti da je test uspješan.



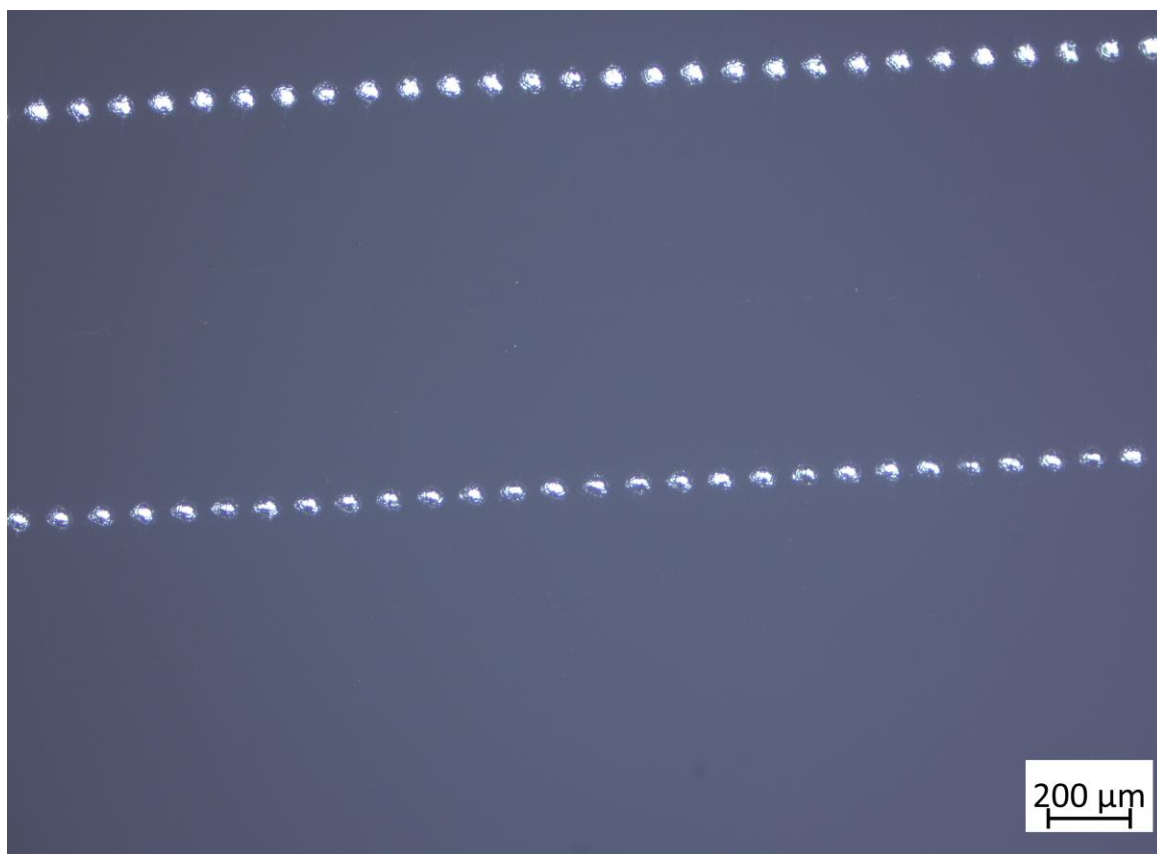
Slika 29. Fokus-pozicija



*Slika 30. Rupice van fokusa*

## **6.2. Analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 0,1$ mm**

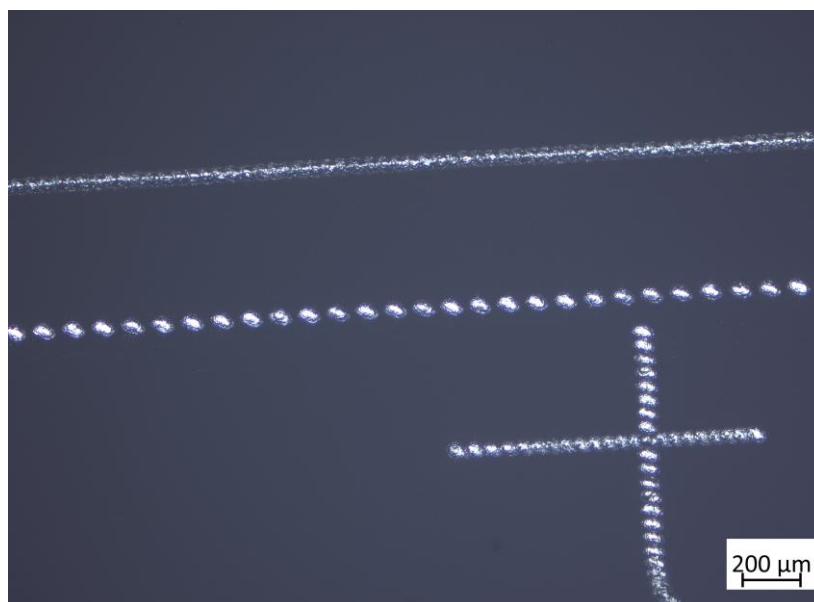
Provjerom prostim okom potvrdilo se da fokus-test izgleda dobro. Postavljanjem obratka - *wafera* ispod mikroskopa provjerava se preciznije je li fokus-test bio uspješan odnosno je li fokus-pozicija postavljena ispravno. Na slici 31 prikazana je fokus-pozicija provedenog testa.



*Slika 31. Prva fokus-pozicija*

Ispod mikroskopa vidljivo je da kružići na fokus-poziciji nisu pravilnog okruglog oblika. Iz toga se razloga može zaključiti da fokus-test nije bio uspješan.

Potrebno je odrediti novi fokus. Da bi se on odredio, koriste se oznake „+“ i „-“, na obratku - *wafere* (slika 32). Te oznake pokazuju je li potrebno objektiv postaviti bliže ili dalje od obratka - *wafere*, tj. pomaknuti objektiv gore ili dolje po z-osi.

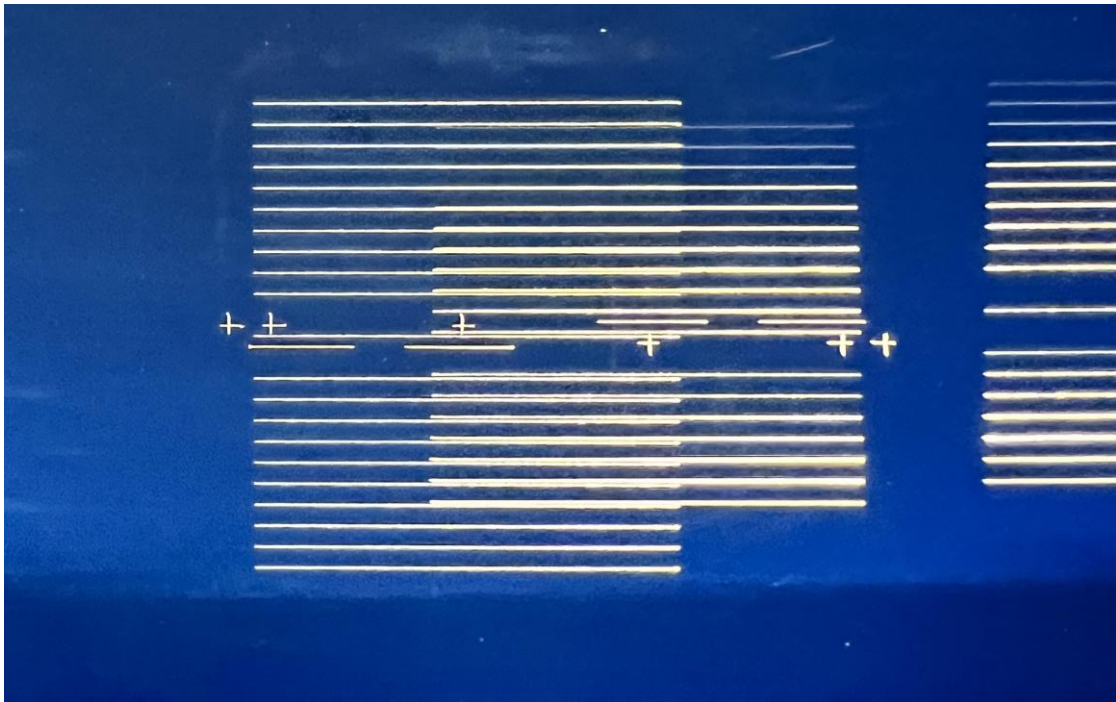


Slika 32. "+" i "-" oznake

Budući da je ispod mikroskopa vidljivo da kružići postaju pravilniji kako se ide prema „+“ oznaci, objektiv se iterativno pomakne 500 nm u pozitivnom smjeru z-osi.

### 6.3. Druga analiza fokus-testa s korakom $\Delta z = 0,1 \text{ mm}$

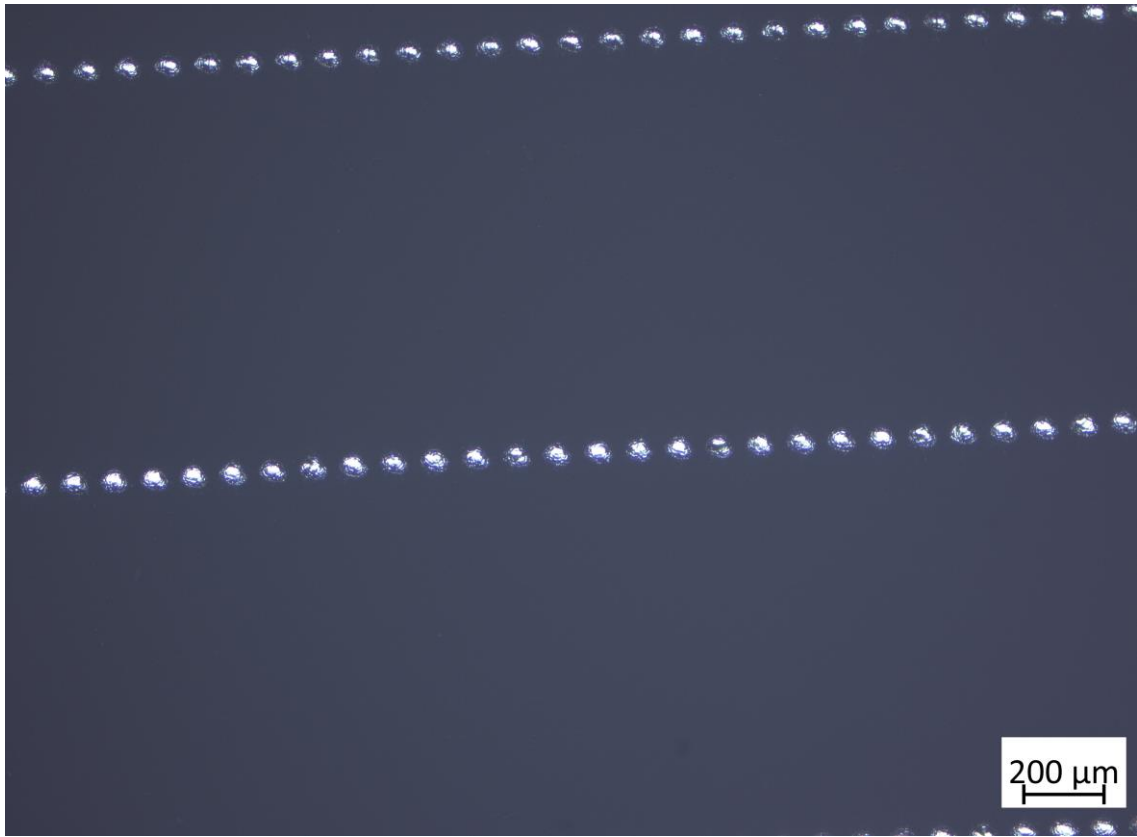
Nakon ponovnog fokus-testa gdje se objektiv pomaknuo za 500 nm u pozitivnom smjeru z-osi, okom se provjerava obradak - *wafer* (slika 33).



*Slika 33. Fokus-test na obratku - waferu*

Postavljanjem obratka - *wafera* ispod mikroskopa proučava se nova fokus-pozicija (slika 34). Uočava se da su kružići pravilnog okruglog oblika te da je novi fokus ispravno odabran. Zaključuje se da je fokus-test bio uspješan.

U usporedbi s time, na slici 35 je prikazana rubna linija provedenog fokus-testa te je vidljiv ovalni oblik kružića.



*Slika 34. Nova fokus-pozicija*



*Slika 35. Rubna pozicija*

## 6.4. Diskusija

Eksperimenti koji su objašnjeni u ovo radu pokazuju preciznost laserskih strojeva. Iako je prvi fokus-test s korakom 1,0 mm izgledao ispravno i dao je točne rezultate, razlika od samo 500 nm u testu s korakom 0,1 mm dala je potpuno drugačiji rezultat. Razlika takvog malog rezultata možda se kod konvencionalnih metoda obrade materijala čini neznačajnom, no laserski procesi time pokazuju svoju visoku točnost i preciznost prilikom obrade. Da se ta razlika zanemarila, laserski bi stroj u daljnjem kalibriranju i radu bio neupotrebljiv te ne bi imao preciznost i točnost koju laserska tehnologija zahtijeva.

Također je bitno naglasiti da analiza prostim okom može dati potpuno krive rezultate i da je u uvijek potrebno posjedovati mikroskop jer samo blago odstupanje od pravilnog oblika kružića može u potpunosti dati novo značenje rezultatu te i stvarati probleme u obradi jer laserska zraka nije fokusirana i te će voditi ka krivoj obradi materijala.

Unatoč detaljnoj analizi koju može provesti svaki radnik koji radi na uređaju, veliku ulogu igra i iskustvo u kalibraciji strojeva – ne samo kod ranog otkrivanja krivog oblika kružića, već i kod iterativnog podešavanja visine objektiva. Dok neiskusni radnik može višestruko podešavati visinu, iskustvo donosi mogućnost procjene gotovo nanometarske preciznosti.

## 7. Zaključak

Kao inženjer potrebno je biti upoznat sa svim tehnologijama obrade zbog njihove širine i raznih primjena pa tako i s novim i modernim tehnologijama koje se svakim danom sve više razvijaju i istražuju. Samim time, laserska tehnologija pruža prilike koje nijedna druga tehnologija ne može s tom efikasnošću.

Prije svega, bitno je poznavati tehnologiju rada lasera te njegovu građu kao i proučiti osnove znanstvenih otkrića koje objašnjavaju temelje laserskih procesa. Tim spoznajama može se razumjeti laserska tehnologija i proširiti znanja kako bi se na kraju mogla i primijeniti u praktičnim uvjetima.

Daljnijim istraživanjem i praktičnom primjenom lasera inženjer ima uvid u osnovne tehnologije obrade laserom i način funkcioniranja te koje mogućnosti pružaju. Obrade laserom visoke su preciznosti i točnosti te obrađuju obradak bez velikih mehaničkih i toplinskih naprezanja. Takva je obrada velika prednost u današnjem svijetu strojarstva koje traži točnost, efikasnost i, najbitnije, ekonomičnost proizvodnje. Smanjenim brojem škartnih komada i visokopreciznom obradom bez prašine, strugotina i sličnih otpadnih dijelova, laser realizira mogućnosti koje su bitne u industriji mikrodijelova i modernih industrija, kao što su industrija mikročipova, solarnih panela i poluvodiča.

Prije primjene bitno je uočiti i važnost točnog rada laserskog stroja da bi se prednosti koje su navedene uopće mogle realizirati. Točnost proizlazi iz precizne i pedantne kalibracije stroja. Fokus-test obrađen u ovom radu pokazuje jedan od bitnih faktora kod točnog postavljanja stroja. U radu stroja fokusiranost omogućuje tanki rez i točnost na razini nanometra, te slične beneficije u odnosu na konvencionalne obradne strojeve.

U konačnici, svijet lasera omogućuje obrade koje nijedan drugi stroj ne može pružiti. Njegovim se širenjem i razvojem proširuje i samo područje strojarstva koje se bavi obradom malih dijelova, ili dijelova za koje je potrebna preciznost i čistoća obrade. Stalnim unapređenjima područja primjene lasera, otkrivaju se velike inovacije koje olakšavaju modernu tehnologiju, a isto tako samo područje znanosti.



## 8. Literatura

- [1] A. Musić: Primjena lasera u strojarstvu, Diplomski rad, Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2017.
- [2] <https://edutorij.e-skole.hr>, dostupno 28.8.2023.
- [3] D. Maršal: Laseri i njihova primjena, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019.
- [4] <http://www.znanje.org>, dostupno 28.8.2023.
- [5] <https://glossary.periodni.com>, dostupno 28.8.2023
- [6] <http://physics.mef.hr>, dostupno 28.8.2023.
- [7] L. Grgić: Laseri, Završni rad, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2017.
- [8] M. Wollitz: Vrste lasera i njihova primjena, Završni rad, Sveučilište u Dubrovniku, Dubrovnik, 2022.
- [9] <https://innolas-solutions.com>, dostupno 28.8.2023.
- [10] <https://en.wikipedia.org>, dostupno 6.9.2023.
- [11] <https://www.cognex.com>, dostupno 6.9.2023.
- [12] P. A. Laplante: Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005.

## Popis slika

Slika 1. Bohrov model atoma [2].....	1
Slika 2. Spektar zračenja [5].....	3
Slika 3. Spontana emisija [6].....	5
Slika 4. Stimulirana emisija [6].....	6
Slika 5. Inverzija napučenosti [6].....	6
Slika 6. Inverzija napučenosti u sustavu s tri energetske razine [7].....	7
Slika 7. Građa lasera [1].....	8
Slika 8. Ultrakratki impulsi laser [9].....	11
Slika 9. Depaneliranje.....	12
Slika 10. Lasersko bušenje [9].....	13
Slika 11. Lasersko strukturiranje [9].....	14
Slika 12. Izrada šupljina [9].....	15
Slika 13. Obradak laserskog zarezivanja [9].....	15
Slika 14. Lasersko zarezivanje [9].....	16
Slika 15. LCO [9].....	17
Slika 16. LDSE [9].....	18
Slika 17. LDC.....	19
Slika 18. LINEXO [9].....	20
Slika 19. Tehnički podaci lasera.....	21
Slika 20. Putanja laserske zrake.....	22
Slika 21. Kolimacija laserskih zraka [10].....	23
Slika 22. Zrcala.....	24
Slika 23. Oscilirajuće zrcalo [11].....	24
Slika 24. Dijelovi u radnoj komori.....	25
Slika 25. Obradak - wafer.....	26
Slika 26. Fokus-test u tijeku.....	27
Slika 27. Fokus-test na obratku - waferu.....	28
Slika 28. Fokus-test na obratku - waferu.....	29
Slika 29. Fokus-pozicija.....	30
Slika 30. Rupice van fokusa.....	31
Slika 31. Prva fokus-pozicija.....	32
Slika 32. "+" i "-" oznake.....	33
Slika 33. Fokus-test na obratku - waferu.....	34

Slika 34. Nova fokus-pozicija .....	35
Slika 35. Rubna pozicija .....	35

# Sveučilište Sjever

## IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARIJA STEPAN (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom TEHNOLOGIJE OBRADJE LASEROM I FOKUS-TEST NA STALJISU LIMEX (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica: MARIJA STEPAN  
(upisati ime i prezime)

Stepan  
(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.