

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 511/2010

Александар М. Бојанић

**ПРИМЕНА ЛАСЕРА ЗА ИЗРАДУ ДЕЛОВА ЗА ВОЈНО
НАОРУЖАЊЕ**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Богдан Недић

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, 2019. године



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основнестудије: **Војно индустријско инжењерство**

Студијскоподручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Алесандар Бојанић**

Бројиндекса: **511/2010**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Примена ласера за израду делова наоружања**

Задатак: У оквиру дипломског рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о примени ласера за израду делова наоружања. Потребно је описати суштину и принцип обраде сечења ласером и дати поделу ласера са основним карактеристикама. У другом делу рада дати примере примене сечења ласером за израду делова наоружања у предузећу Застава оружје, Крагујевац.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Увод,
2. Теоријске основе обраде ласером,
3. Принцип обраде ласером,
4. Врстеласера,
5. Прима ласера и мере заштите на раду,
6. Примериизраде делова наоружања,
7. Закључци,
8. Литература.

Ментор:

ДрБогдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 28.08.2019.

Резиме

Овај рад има за циљ да дефинише примену ласера за израду делова намењених за војну индустрију. Поред тога у раду је представљен развој ласера кроз историју, од почетака па до дана данашњег. Такође је приказан је принцип рада ласера и неке основне поделе ласера према врсти материјала активне средине, према режиму рада, према начину побуде материјала активне средине и према области спектра у којој емитује светлост. Због својих посебних карактеристика и широких могућности примене, ласери се користе у многим сферама живота, овим радом смо се осврнули и на широк спектар примена ласера. При раду са ласерима човек се излаже опасностима, па је неопходно применити одређене мере заштите при раду, које су у поглављу шест представљене. У раду је акценат стављен на израду делова наоружања применом технологије ласерског сечења.

Abstract

This paper aims to define the use of lasers for the manufacture of parts intended for the military industry. In addition, the paper presents the development of lasers throughout history, from the beginning to the present day. The principle of operation of the laser and some basic division of the laser by the type of material of the active medium, by the mode of operation, by the mode of excitation of the material by the active medium and by the region of the spectrum in which light is emitted. Due to their special characteristics and wide application capabilities, lasers are used in many spheres of life, and this work also addresses a wide range of laser applications. When working with lasers, a person is exposed to hazards, so it is necessary to apply certain safety precautions, which are presented in chapter Six. The paper focuses on the fabrication of weapons using laser cutting technology.

Садржај

1. Увод	5
2. Ласер	6
2.1 Хронолошки преглед развоја ласера кроз историју	6
2.2 Теорисјке основе ласера	8
3. Принцип рада ласера	10
4. Врсте ласера	12
4.1 Подела ласера према врсти материјала активне средине	12
4.1.1 Гасни ласери	12
4.1.2 Течни ласери	17
4.1.3 Ласери чврстог стања	19
4.1.4 Полупроводнички ласери	22
4.1.5 Хемијски ласери	23
4.1.6 Ласери са слободним електронима	24
4.2 Подела ласера према режиму рада	25
4.3 Подела ласера према начину побуде материјала активне средине	26
4.4 Подела ласера према области спектра у којој емитују светлост	27
5. Примена ласера	28
6. Мере заштите при раду са ласером	32
7. Израда делова наоружања применом технологије ласерског сечења	33
8. Закључак	43
Литература	44

1. Увод

Ласер је оптички извор који производи усмерено светлосно зрачење, које се генерише механизмом стимулисане емисије настале као последица интеракције електромагнетног зрачења и активне средине. Ласерско зрачење настаје захваљујући могућности да се код неких материјала оствари инверзна насељеност на вишим енергијским нивоима.

У првом делу рада изложене су теоријске основе на којима се заснива практична реализација ласерских система. Наведене су теоријске поставке Ајнштајна који је 1917. године утврдио концепт стимулисане емисије као темељни принцип теорије која је омогућила даљи рад на развоју ласера. Ајнштајн је искористио Планкову тезу о дисконтинуалном карактеру светлости и постојању најмање количине светлости у облику фотона, односно кванта светлости и математичким путем утврдио вредности вероватноће одигравања процеса апсорпције, спонтане емисије и стимулисане емисије.

У наставку су истакнути основни принципи рада ласера и његова примена, конкретно везано за израду делова за војно наоружање. Ласер је нашао примну у многим областима као што су: индустрија, медицина, наука, екологија, роботика, информатика, холографија и војна индустрија.



Слика 1. Индустриска примена ласера [18]

Захваљујући високом фокусирању ласерског снопа, високој густини енергије снопа, могућности једноставног управљања ласерским снопом и обраде у веома различитим срединама, обрада ласером добија све већи значај и има низ предности у односу на остале неконвенционалне поступке обраде. Због свега наведеног, налази примену у разним индустријама. У раду ћемо се везати за примену ласера у изради делова намењених за војну индустрију. Биће представљено коришћење ласера у производном погону фабрике Застава оружје (Zastava arms).

2. Ласер

Ласер потиче од енглеског термина „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ што у преводу значи појачавање свтлости стимулисаном емисијом зрачења. Заправо је ласер светлосни осцилатор, односно генератор монохроматске, кохерентне и усмерене светлости. Главно својство овакве светлости је могућност фокусирања на тачку малих димензија.

Ласери се разликују према врсти активног материјала који служи за појачавање светлости. За резање се употребљавају CO₂ и Nd:YAG ласери који су добили име према врсти активног материјала.

Данас, индустријска производња, бележи пораст примене технологије обраде (резањем) ласером. Због бројних предности које ова метода пружа, упркос недостатку у виду високих инвестиционих трошкова.

2.1 Хронолошки преглед развоја ласера кроз историју

Планк је 1900. године поставио основе теорије о дисконтинуалном карактеру енергије и постојању кванта енергије који представља најмању количину електромагнетног зрачења (енергије) у простору.

Алберт Ајнштајн је 1917. године у свом раду „О квантној теорији зрачења“ увео појам стимулисане емисије и показао да у стању термодинамичке равнотеже Планков закон зрачења црног тела произилази из интеракције спонтане емисије, стимулисане емисије и апсорпције зрачења. Његов теоријски концепт стимулисане емисије касније ће бити коришћен за конструкцију и израду ласера, односно створен је основ за развој ласера и његову практичну реализацију.

1954. године - Ч. Таунс конструише масер, као први уређај који ради на принципустимулисане емисије у микроталасном (невидљивом) делу спектра. Исте године А. Прохоров и Н. Басов откривају масер независно од Ч. Таунса [2].

1960. године - Теодор Мејман конструише ласер, уређај који ради на принципу стимулисане емисије али у видљивом делу спектра. Као активну супстанцу је користио рубин, кристал алуминијумовог оксида (Al₂O₃) коме су додати атоми хрома у малим количинама, око 0,05% [2].

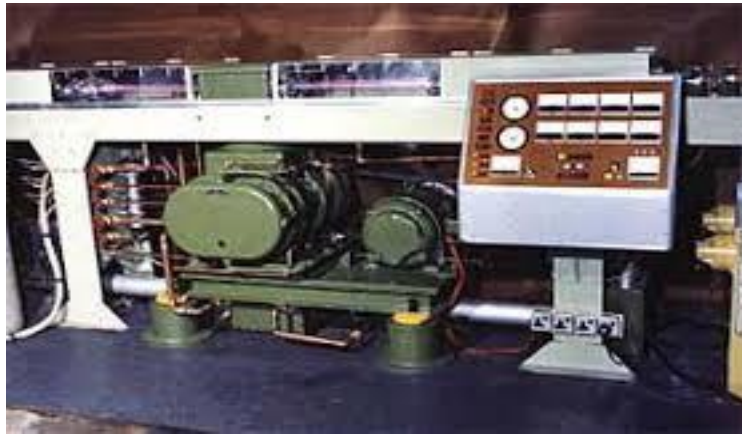


Слика 2. Први успешан радни ласер, који је конструисао Теодор Мејман [19]

1962. године - Роберт Хол конструисао је полупроводнички ласер [2].

1964. године - Ц. К. Н. Пател конструисао је гасни CO₂ ласер [2].

1970. године – појава првог прототипа обрадног центра с ласерском главом, тада још недовољно усавршен за серијску производњу [2].



Слика 3. Први прототип ласерског обрадног центра [20]

1972. године - први пут у ратним условима (Вијетнам) ласер је коришћен за означавање мета [2].

1974. године - ласер први пут примењен у супермаркетима као читач бар кодова [2].

1979. године - у космосу у маглини Орион откривено зрачење, блиско инфрацрвеном делу спектра, које одговара карактеристикама ласерског зрачења [2].

1979. године - употребом ласера је направљен први CD player (Philips) [2].

1980. године - конструисан ласер који емитује ласерску светлост у подручју X зрачења. Исте године дешава се увођење ласера у индустрију. Ласер се уводи у индустријску употребу код резања лима, након тога и осталих материјала, те данас постаје саставни део савремене технике обраде материјала [2].

1981. године - у атмосфери Марса и Венере откривен је CO₂ ласер, што указује на постојање процеса у космосу који доводе до настанка ласера (и масера) природног порекла. Масер је уређај који ради на исти начин као и ласер, али у другом фреквенцијском подручју. Масер је извор микроталаса, док је ласер извор електромагнетских таласа у инфрацрвеном видљивом делу спектра [2].

1985. године - конструиран први комерцијални ласер за примену у офталмологији (хирургија ока) [2].

2.2 Теориске основе ласера

Проналаску ласера су претходила истраживања изведена у оквиру квантне механике као посебне области физике. Планк је 1900. године поставио теоријске основе квантне механике према којој енергија има дисконтинуални карактер, па се емитује и апсорбује у облику кванта енергије који представља најмању количину енергије.

Алберт Ајнштајн је 1917. године у свом раду „О квантној теорији зрачења”, дао теоријски концепт стимулисане емисије светлости и повезао је са Планковом теоријом о квантној природи светлости, по којој је фотон најмања количина светлости која се емитује. На тај начин је створена основа за развој ласера и његову практичну реализацију.

Приликом апсорпције зрачења атом апсорбује фотон светлости, постаје побуђен и прелази у више енергијско стање, при чему је енергија упадног фотона једнака разлици енергија нижег и вишег енергијског стања у који атом прелази.

Спонтана емисија светлости је емисија која настаје спонтаним преласком атома (молекула), без спољашњих утицаја, из побуђеног у ниже енергијско стање (или у основно). Преласком на нижи енергијски ниво, атом емитује фотон чија је енергија једнака разлици енергија два нивоа између којих се врши прелаз. Оваква емисија електромагнетног зрачења, без спољних утицаја даје некохерентну светлост, јер побуђени атоми спонтано емитују фотоне које не карактерише просторна и временска кохерентност (емитовани фотони имају различите правце простирања, амплитуде, различите равни поларизације и фазе, односно фазе нису међусобно повезане).

Стимулисана емисија светлости настаје дејством спољашњег електромагнетног зрачења на побуђене атоме (молекуле) активне средине, при чему је енергија зрачења једнака разлици енергија енергијских нивоа између којих се врши прелаз. Притом долази до преласка електрона на нижи ниво и емитовања фотона чија енергија одговара разлици енергија вишег и нижег енергијског стања (стимулисано зрачење).

Правац и смер емитованих фотона, њихове фазе и равни поларизације, су исти као и код упадних фотона који су изазвали овакву, принудну емисију светлости (просторна и временска кохерентност). Таласна дужина светлости коју ласер зрачи, одређена је количином енергије коју електрон отпушта приликом преласка са вишег на нижи ниво.

Да би дошло до стимулисане емисије атом (молекул) треба довести у метастабилно стање, односно довести електрон на виши енергијски ниво који има знатно дуже средње време живота, (реда величине 10^{-3} s) у односу на друге краткоживеће енергијске нивое (средње време живота реда величине 10^{-8} s). Постојање метастабилних нивоа је кључни услов за рад ласера јер тада, због дужег задржавања атома у побуђеном стању, неће сви атоми бити истовремено деекситовани, имајући у виду да у микросвету владају закони статистике и вероватноће по којима је истовремена деекситација свих побуђених атома мало вероватна. Неки атоми ће се раније деекситовати (прећи у ниже енергијско стање) и емитовати фотоне који ће извршити стимулисану емисију на оним атомима који још нису деекситовани или пак извршити побуђивање атома који се налазе у основном стању, што доводи до великог умножавања фотона и интензивирања целог процеса.

Услов за настанак ласерске светлости је постојање инверзне насељености атома на вишим енергијским нивоима, што значи да број атома у побуђеном, ексцитованом стању мора бити

већи од броја атома на непосредно нижем или основном стању. Стање супстанце у коме се већина атома налази у побуђеном стању назива се стање инверзне насељености или инверзне популације. До појаве инверзне насељености долази под дејством спољашњег поља (спољашњег електромагнетног зрачења), када атоми бивају ексцитовани (побуђени) па прелазе са нижег у више енергијско стање. Инверзна насељеност може постојати између метастабилног стања и непосредно нижег побуђеног стања. Задржавање атома у метастабилном стању је дуже него у обичном побуђеном стању па због тога настаје инверзна насељеност.

Само ретке супстанце омогућавају стварање инверзне насељености, па је важан корак приликом пројектовања ласера проналажење такве супстанце која омогућава формирање стања инверзне насељености, односно стварање стања где је више атома у побуђеном стању него што их има у основном стању.

Ласерско зрачење настало стимулисаном емисијом светлости карактерише монохроматичност и кохерентност. Монохроматска светлост је светлост која има исту таласну дужину и исту боју (грчки монос хромос-једна боја). Код кохерентне светлости фазна разлика између упадних и емитованих фотона је константна, а емитовани фотон има исти правац и смер као и упадни, па ласерске зраке карактерише висока усмереност. Таква светлост је кохерентна и просторно (стална фазна разлика у различитим просторним тачкама у истом временском тренутку) и временски (стална фазна разлика у истој тачки у простору у различитим временским тренуцима).

3. Принцип рада ласера

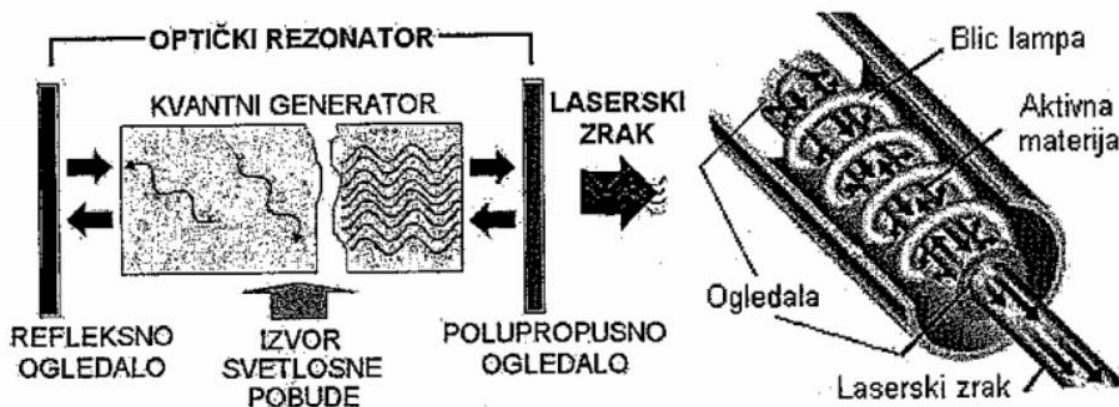
Први уређај који је емитовао усмерени сноп кохерентне светлости високог интензитета конструисан је 1954. године и познат је под називом масер. Конструисао га је Таунс, а независно од њега исте године Басов и Прохоров. Масер је уређај који ради на исти начин као и ласер, али у другом фреквенцијском подручју и емитује светлост у микроталасном делу спектра.

Ласер је оптички извор (оптички квантни генератор) који у процесима стимулисане емисије емитује кохерентно зрачење у инфрацрвеном и видљивом делу спектра. Први ласер је конструисао Т. Мејман 1960. године, а познат је под називом рубински ласер.

Ласер производи усмерени светлосни сноп високог интензитета и разликује се од других, конвенционалних извора светлости.

Делови ласера су:

1. Активна средина;
2. Систем за побуђивање;
3. Резонатор (са непропусним огледалом и делимично пропусним огледалом);
4. Систем за хлађење.



Слика 4. Принципијална шема извора ласерских зрака [21]

Активна средина ласера је супстанца чији атоми (молекули) учествују у процесима стимулисане емисије и може бити у гасовитом, течном или чврстом стању.

Систем за побуђивање врши екситацију атома (молекула) активне средине оптичком побудом, путем електричног пражњења, хемијским реакцијама итд.

Резонатор је осцилаторни систем ограничен са два огледала, једним непропусним и другим делимично пропусним, унутар кога се осциловањем електромагнетних таласа (светлости) врши појачавање светлости кроз процесе стимулисане емисије.

Систем за хлађење одводи топлоту насталу у току процеса стимулисане емисије код нерадијативних прелаза, без зрачења, када се енергија троши на загревање активне средине. Ласерска обрада материјала заснована је на претварању високо-концентрисане светлосне енергије, добијене стимулисаним зрачењем у топлотну.

Сноп ласерских зрака, фокусиран на радни пречник, постао је универзални алат који практично може да обрађује све врсте материјала. За разлику од конвенционалног алата, он се не мора набављати за производњу нити складиштити.

При раду са ласерима постоји могућност да човечји организам или део тела буде изложен ласерском зрачењу. Дејство ласерског зрачења на човечји организам испољава се у виду светлосног и топлотног ефекта. Светлосни ефекат изазива оштећење органа вида док топлотни ефекат ствара опекотине коже.

Примена ласера у индустрији, за обраду материјала, мерење и контролу квалитета, намеће потребу за предузимање мера безбедности и здравља на раду и околине од ласерског зрачења и последица ласерског зрачења.

Ласерске машине за индустријску примену су почеле да се израђују пре тридесетак година. Развој је текао врло брзо и у данашње време се у свету годишње инсталира преко 3000 ласерских машина за обраду материјала. При пројектовању и изради ласерских машина комбинују се искуства стечена при изради конвенционалних машина са неконвенционалним особинама ласерске обраде. Ласерска обрада је заснована на примени ласерског зрачења за обраду материјала загревањем, топљењем или испаравањем. У зависности од таласне дужине ласерског зрачења, количине енергије у конкретном случају, степену фокусирања као и термофизичких и оптичких особина материјала обрадка постижу се различити технолошки ефекти који подстичу велико интересовање за област ласерске технологије. Могућност примене уско је повезана са коришћењем погодних манипулатора и технологија које омогућавају најбоље искоришћење ласерског зрачења. Овај процес је у основи сваког поступка ласерске обраде.

Који ће се од њих испољити зависи од: густине снаге ласерског зрачења, времена интеракције снопа ласерских зрака и материјала обрадка и специфичне енергије потребне за одређену обраду. Густина снаге ласерског зрачења 10^4 W/cm^2 и време интеракције $10^{-2} - 10^{-1} \text{ s}$ користи се за термичку обраду (каљење), густина снаге $10^5 - 10^6 \text{ W/cm}^2$ и време интеракције $1-10 \text{ ns}$ користи се за заваривање, густина снаге 10^6-10^8 W/cm^2 и време интеракције $1-10 \text{ ns}$ користи се за бишење и сечење до густина снаге већа од 10^6-10^8 W/cm^2 омогућава експлозивно уклањање материјала.

Погодност ласера, као светлосног и топлотног извора, за обраду материјала резултат је јединствених карактеристика снопа ласерских зрака. Таласна дужина, снага, временски облик и трансверзална модна структура одређују начин на који сноп ласерских зрака загрева материјал. Ти фактори одређују избор ласера за одређену примену, али се при томе не сме занемарити цена и економичност ласерске машине. Дејство ласерског зрачења на човечји организам испољава се у виду светлосног и топлотног ефекта.



Слика 5. Примена ласера у индустрији за сечење [22]

4. Врсте ласера

Подела ласера може се извршити према различитим критеријумима. Овде су наведене само неке поделе, односно подела према:

1. Врсти материјала активне средине (гасни, течни, ласери чврстог стања);
2. Режиму рада (континуални и импулсни);
3. Начину побуде материјала активне средине (ласери са оптичком побудом, путем електричног пражњења и сударима електрона, побудом хемијским реакцијама, нуклеарним реакцијама);
4. Области спектра у којој емитују светлост.

4.1 Подела ласера према врсти материјала активне средине

На основу врсте материјала активне средине може се извршити следећа класификација ласера:

1. Гасни ласери;
2. Течни ласери;
3. Ласери чврстог стања.

4.1.1 Гасни ласери

Код гасних ласера радна или активна супстанца унутар резонатора је у гасовитом агрегатном стању, с тим што такав гас може бити састављен од атома, молекула или јона па кажемо да постоје атомски, јонски и молекуларни гасни ласери. Најчешће коришћени гасови

код ове врсте ласера су мешавина хелијума и неона (He-Ne), аргон (Ar), криптон или угљендиоксид (CO₂). Овакви ласери раде како у континуалном, тако и у импулсном режиму рада. Код гасних ласера побуда се може остваривати пражњењем кроз гас, оптички, радиоталасима, итд., али је најчешћи облик побуде сударна екситација.

На електроде, уграђене у цев ласера, доводи се електрични напон након чега, под дејством електричног поља електрони између аноде и катоде се убрзавају и сударају са честицама гаса и долази до екситације гаса у цеви. Електрон заправо, предаје део енергије честици и доводи је у побуђено стање. Резонатор код гасних ласера је направљен од керамике или стакла, а ласери су лаки за коришћење и једноставне су конструкције.

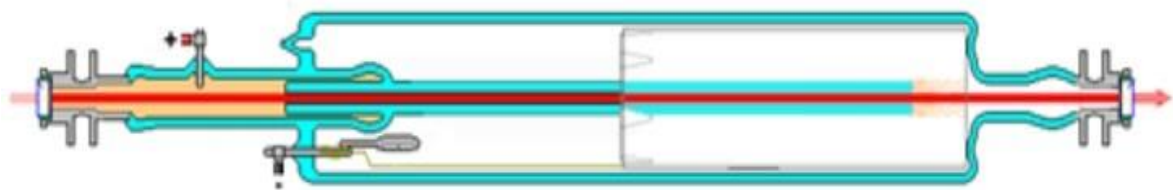
Хелијум-неонски ласер (He-Ne ласер) је гасни ласер који се најчешће користи, а одликују га следеће особине:

- ради у континуалном режиму рада,
- емитује видљиву светлост,
- ласерско зрачење је веома добро усмерено,
- стабилан је и сугуран у раду,
- представља ласерски систем мале снаге (максимално 100 mW).

Овај ласер се користи у случајевима када није потребна велика снага као што је скенирање бар-кодова, различита мерења, итд.

Побуда активне супстанце врши се електричним пражњењем кроз смешу хелијума и неона при притиску од око 100 Ра. Пражњењем у смеси гасова настаје и одржава се струја јачине 10 mA – 20mA. Активна супстанца код овог ласера је смеша хелијума и неона у размери 10:1. Светлосни сноп је ширине 1 – 2 mm, а просечна снага је мала и износи око 20 mW.

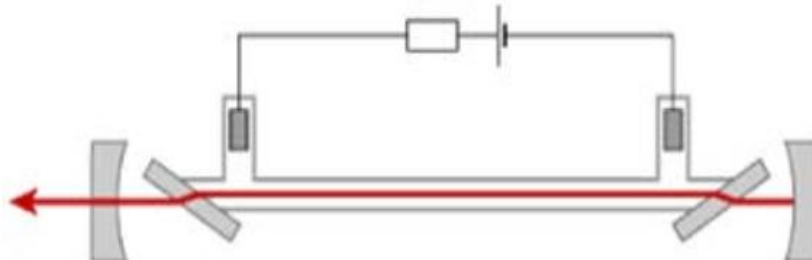
Хелијум-неонски ласер може радити на више таласних дужина у видљивој и инфрацрвеној области спектра. Шема конструкције He-Ne ласера је представљена на слици 6.



Слика 6. Шематски приказ He-Ne ласера [23]

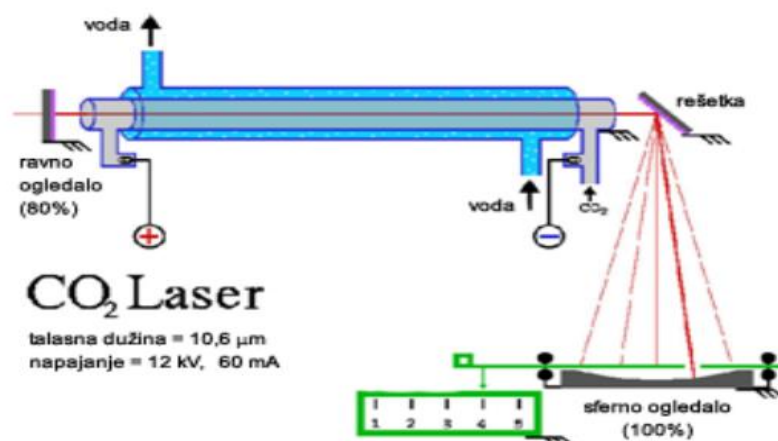
Пумпање се постиже електричним пражњењем кроз гасну мешавину He-Ne једносмерном или наизменичном струјом. Електрони који се убрзавају између аноде и катоде се сударају са атомима хелијума и неона у ласерској цеви и тако велики број атома хелијума и неона прелази у побуђена стања.

Заправо, често се јавља потреба да ласерска светлост буде линеарно поларизована. У ту сврху се на крајеве ласерске цеви постављају прозори под Брустеровим углом, који од две компоненте поларизације, паралелне и нормалне, пропуштају само паралелну док нормалну рефлектују. Брустерови прозори постоје готово на свим цевима гасних ласера. Конструкција се разликује за атомске, јонске и молекуларне ласере.



Слика 7. He-Ne ласер са Брустеровим прозорима [24]

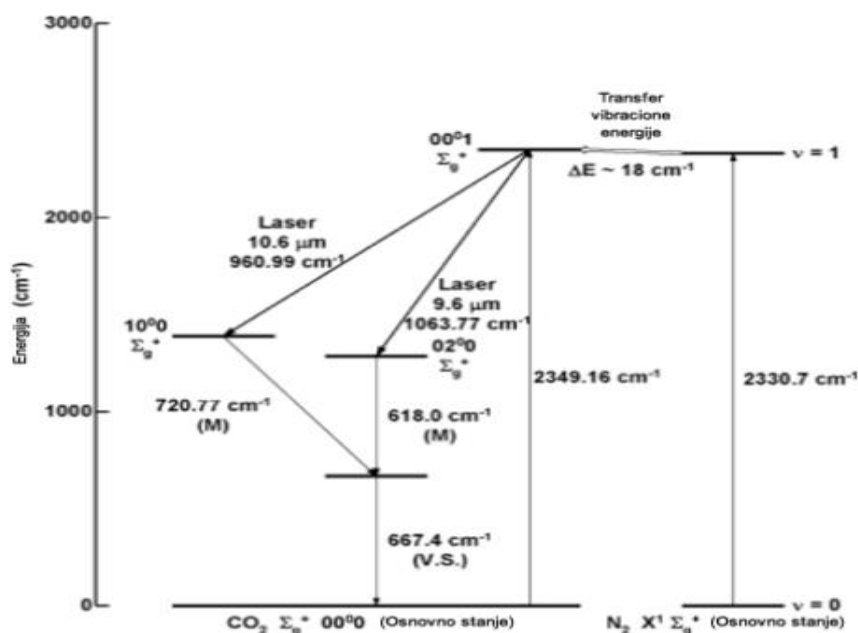
CO₂ ласер спада у групу молекулских ласера, а конструисао га је Ц. К. Н. Пател 1964. године, тако што је кроз цев испуњену чистим CO₂ пропустио струју и касније установио да је за добијање ласерског зрака велике снаге потребно додати азот (N₂) и хелијум (He) са односом унутар смеше CO₂:N₂:He - 1:1:8. Таква смеша обезбеђује квалитетан рад у континуалном режиму рада. При оваквом саставу смеше азот (N₂) подстиче побуђивање молекула CO₂, а хелијум подржава процес пражњења нижих енергијских нивоа и на тај начин омогућава стварање и одржавање инверзне насељености (већа попуњеност на вишим енергијским нивоима). Присуство азота у CO₂ ласеру, заправо доприноси повећању насељености вишег енергијског нивоа.

Слика 8. Шематски приказ CO_2 ласера [25]

CO_2 ласер се одликује великом излазном снагом и високом ефикасношћу (10-30%) конверзије електричне енергије у оптичку. Хелијум има висок коефицијент топлотне проводљивости и његово додавање активној средини CO_2 ласера доприноси бољем хлађењу угљендиоксида. Пошто је насељеност нижег енергијског нивоа мања ако је температура нижа, улога He код CO_2 ласера је заправо смањење насељености нижег ласерског нивоа.

У процесу пумпања CO_2 ласера, поред промена у просторној расподели електрона у електронској конфигурацији, веома су значајне промене у вибрационим енергијским нивоима атома у молекулима, као и ротационе и транслационе побуде молекула. Молекули CO_2 су линеарни троатомски молекули, код којих се атом угљеника налази симетрично у средини, између два кисеоникова атома. Вибрације атома у молекулима CO_2 се описују помоћу три вибрациона мода: симетрично истезање, савијање и асиметрично истезање. Вибрациони енергијски нивои молекула CO_2 се описују са три квантна броја који представљају вибрационе модове.

Нпр. вибрациони енергијски ниво 01^10 описује осцилацију у којој се један вибрациони квант енергије налази у моду 2 (овај вибрациони ниво иначе има најмању енергију).

Слика 9. Приказ енергијских нивоа са прелазима код CO_2 ласера [26]

Ласерски прелази код CO_2 ласера се одвијају између вибрационог нивоа 00^01 који представља горњи ласерски ниво и вибрационог нивоа 10^00 који представља доњи ласерски ниво ($\lambda=10,6\mu\text{m}$). Могуће је добити и ласерски прелаз између вибрационих нивоа 00^01 и 02^00 ($\lambda = 9,6\mu\text{m}$).

Пумпање горњег ласерског нивоа 00^01 се веома ефикасно постиже резонантним трансфером енергије у директним сударима молекула CO_2 са побуђеним метастабилним молекулима азота N_2 , а такође и директним сударима молекула CO_2 са електронима. Као двоатомни молекул, азот има само један вибрациони мод и два енергијска нивоа $U=0$ и $U=1$. Као што се види на слици 9, виши вибрациони ниво $U=1$ је енергијски веома близак побуђеном нивоу 00^01 молекула CO_2 . Хлађење система хелијумом доприноси депопулацији доњег ласерског нивоа 10^00 односно 02^00 .

Овај тип ласера има следеће својства:

- велику снагу излазног зрачења (више од 10 kW);
- зрачење у блиској инфрацрвеној области ($9\,600\text{nm} < \lambda < 11\,000\text{nm}$);
- рад у континуалном и импулсном режиму рада.

Овакви ласери имају велику снагу, а у импулсном режиму рада и већу него у континуалном режиму па су нашли широку примену у металопрерађивачкој индустрији. Импулсни режим рада постиже се уколико се једно фиксно огледало замени ротирајућим.

Аргонски ласер Ar^+ (В. Брицс га је први конструисао 1964. године) припада групи јонских гасних ласера. Аг ласер је снажан ласер који може генерисати ласерско зрачење на осам таласних дужина светлости у видљивом делу спектра. Најчешће, Аг ласер емитује светлост плаве боје ($\lambda = 488\text{ nm}$) или зелене боје ($\lambda = 514,5\text{ nm}$).

Ексимер ласер је гасни ласер са значајно унапређеним техничким карактеристикама. Ексимер је назив за молекуле који се најчешће састоје од два атома од којих један има комплетно попуњену валентну љуску, тако да је формирање молекула могуће једино ако је такав атом у побуђеном стању. Ексимер (excimer) је скраћеница од енглеског назива – excited dimer. Термин ексимер је уобичајен и за молекуле овог типа који имају више од два атома и чији је правилан назив exciplex (скраћено од енглеског назива excited complex).

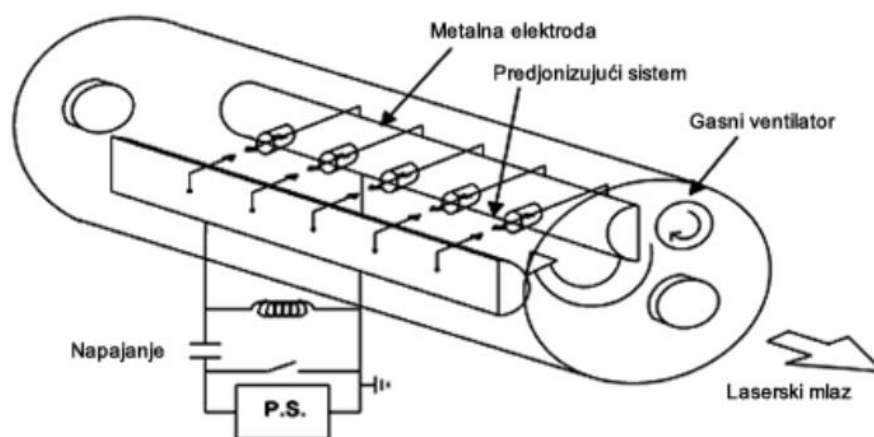
Ексимер молекули који се најчешће примењују код овог типа ласера се састоје од атома инертног гаса и халогеног елемента нпр. ArF , KrF , XeF , XeCl . Овакви молекули не постоје у природи, али се могу произвести електричним пражњењем одговарајуће гасне мешавине. Време живота ексимера је врло кратко и мери се наносекундама.

Ексимери су молекули који постоје само у побуђеном стању. Када се ексимер врати у основно стање, његове компоненте спонтано дисосују, тако да је популација основног стања ових ласера увек нула. Услов инверзне популације је испуњен у моменту када постоји побуђено стање. Радна средина ексимер ласера је мешавина инертног гаса (Ar , Kr , Xe) и халогеног елемента (F , Cl) у хелијуму или неону на високом притиску. Таласна дужина емитоване ласерске светлости се може подешавати и зависи од удела инертног гаса и халогеног елемента у гасној мешавини.

Ексимер молекула, XeCl на пример, настаје у радној средини гасне мешавине коју сачињава 1,27% ксенона и 0,05% хлороводоничне киселине, док 98,68% представља гас неон.

Побуда се постиже кратким снажним импулсима електричног пражњења, реда величине наносекунде. Под дејством импулса електричног пражњења долази до јонизације атома инертног гаса, тј. ксенона: $\text{Xe} \rightarrow \text{Xe}^+$.

Јонизовани ксенон реагује са хлором и формира халогенид инертног гаса ксенона XeCl . Ласерском емисијом молекули XeCl прелазе из побуђеног у основно стање. После стимулисане или спонтане емисије ексимер молекул одмах дисосује, тако да је избегнута реапсорпција генерисаног зрачења.



Слика 10. Шема ексимер ласера [27]

Слика 10 показује шему једног ексимер ласера. С обзиром на корозивну природу примењених гасова, тело ексимер ласера се израђује од нерђајућег челика, поливинилских и тефлонских компоненти. Пражњење је обично трансверзално, електроде су дугачке, равне и направљене од никла и бакра. Слично као код CO_2 ласера постоји предјонизација која обезбеђује униформну побуду.

Ексимер ласери су импулсни, дужина трајања импулса је неколико десетина наносекунди. Просечна снага ексимер ласера је око 100 W, а фреквенција импулса је до 1 kHz. Електрични коефицијент корисног деловања је 1%. Ексимер ласер је снажан ласер који скоро увек ради у UV области. Примењују се за проучавање сложених фотохемијских процеса, за сепарацију изотопа, у фотолитографији, у производњи чипова, у офталмологији (ArF ласер таласне дужине 193 nm), за лечење псоријазе (XeCl ласер таласне дужине 308 nm), за побуду течних ласера итд.

Ласери са металним парама спадају у категорију јонских гасних ласера, јер се одговарајућим процесима мора претходно извршити јонизација, а након тога и довођење јона у побуђено стање. Јонизација и пумпање активне средине се остварује пропуштањем струје кроз медијум. Код јонских ласера као радни прелази се користе енергијски нивои јона. Активна средина код ових ласера мора садржати довољно велики број јона, при чему у сударима електрона са атомома настају јони, а у сударима електрона са јонима долази до настанка побуђених јона. Активна средина ласера могу бити паре метала: Cu, Pb, Zn, Sn, Cd и Se. Познатији ласери са металним парама су He-Cd, He-Se и He-Cu ласер.

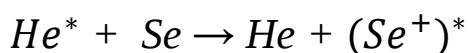
Код He-Cd ласера процес јонизације се може представити следећом релацијом:



где је звездицом означен побуђени атом, односно јон. Овај ласер се назива кадмијумски јер се прелази догађају између побуђених јона кадмијума (Cd^+)*.

Јонизацију, а затим и побуђивање атома кадмијума Cd врше побуђени атоми хелијума He^* , при чему се вишак енергије коју поседује побуђени атом хелијума претвара у кинетичку енергију електрона. He-Cd ласер има излазну снагу до 100 mW.

Јонизација код He-Se ласера (селенски ласер) се може приказати једначином :



Прелазима са различитих енергијских нивоа побуђених јона селена $(Se^+)^*$ на ниже нивое настају ласерска зрачења на деветнаест различитих таласних дужина у видљивом делу спектра.

He-Cu ласер захтева високе температуре (1400°C) да би се постигао довољно висок притисак пара бакра, па се користе соли бакра за које је та температура 250°C.

Ласери са металним парама у својој конструкцији уз аноду имају мали резервоар са металом који се загрева да би се обезбедио довољно висок притисак за рад, као на пример загревање до 250°C за Cd. Потрошња кадмијума је притом 1 g на 1000 сати рада ласера.

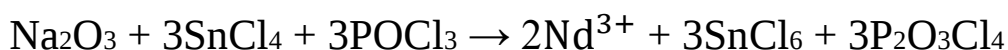
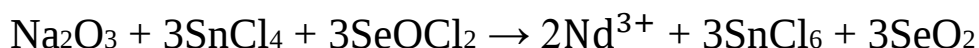
4.1.2 Течни ласери

Код течних ласера радна или активна супстанца је у течном агрегатном стању. Први течни ласери развијени су 1963. године. Даљи развој течних ласера текао је у смислу израде како органских тако и неорганских ласера. Важан моменат у развоју ових ласера је откриће првог течног ласера са органским бојама 1966. године.

Недостатак течних ласера је промена структуре раствора због појаве талоба, који се након одређеног, не тако дугог времена (до 2 месеца) формира и значајно утиче на функционалне карактеристике ласера. Ласери са течномешом се морају хладити што се постиже пропуштањем течности кроз расхладни уређај.

Постоје два типа течних ласера и то су ласери са неорганским течностима и ласери са органским бојама. Основни недостатак ласера са неорганском течномешом је немогућност рада у континуалном режиму рада. Ласери са органским бојама раде у континуалном режиму с тим што код њих постоји могућност континуалног подешавања таласних дужина укључивањем различитих селективних елемената у резонатор.

Највише коришћени неоргански ласери су ласери на бази раствора соли неодимијума (Nd) у неорганским течностима као на пример $SeOCl_2$ (селен оксидхлорид) и $POCl_3$ (фосфороксихлорид) у присуству $SnCl_4$ или $ZrCl_4$. У овим растворима настају следеће хемијске реакције:



Као резултат ових реакција настају јони Nd^{3+} који учествују у апсорпционим и емисионим процесима па се ови ласери могу сматрати варијантом неодимијумских ласера (као код ласера чврстог стања).

Недостаци неорганских ласера су велики почетни раст излазне снаге, а затим пад због губитака насталих као последица нехомогености течности па с тим у вези недовољне ефективности лампе, бљескалице.

У импулсном режиму рада излазна снага ових ласера достиже вредност и до неколико MW. Неодијумски течни ласери се користе за ласерску емисију великих снага и енергија чак до 50 MW.

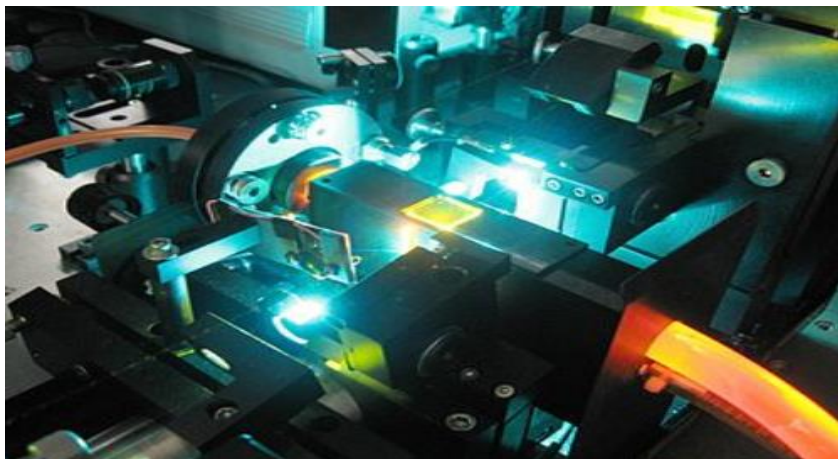
Течни ласери са органским бојама су ласери са веома добрим карактеристикама као што је особина да се њихове таласне дужине могу мењати континуирано у широком опсегу. Зрачење ових ласера може бити у области од блиског ултраљубичастог до блиског инфрацрвеног подручја спектра. Органске боје које се најчешће користе као активна средина код ових ласера су: родамин 6Г, родамин Б, п-терфенил, кумарин 2, кумарин 6 итд. Као растварачи ових боја се могу користити алкохоли (етил-алкохол, метил-алкохол), бензол, етанол или вода.

Молекули органских боја су системи са три енергијска нивоа. Енергијски нивои код молекула органских боја су заправо енергијски интервали, траке веће ширине, а не уско одређени нивои. Разлог за ово је вибрациона енергија молекула боје. Управо овакви интервали, а не нивои у класичном смислу, омогућавају остваривање континуалног подешавања таласних дужина зрачења. Време живота на овим нивоима (интервалима) је кратко па су потребне високе енергије пумпања да би се одржавала инверзна насељеност у потребном обиму.

Пумпање код ових ласера се изводи помоћу лампи, бљескалица, азотног ласера или других ласера чврстог стања као што је рубински ласер који је раније више коришћен у ове сврхе. Континуалну промену таласних дужина ласерског зрачења је могуће постићи на више начина. Најједноставнији начин је промена концентрације боје, тако што се повећањем концентрације у раствору повећава таласна дужина или промена врсте растварача. Ово се при сталној концентрацији може постићи и употребом посебних дисперзионих елемената унутар резонатора, а то могу бити призма или оптичка решетка, чијим заокретањем се мења таласна дужина зрачења.

Излазна снага ласера са органским бојама пумпаних лампом, бљескалицом достиже вредности од 100 W. Недостатак ласера са органском бојама је разлагање боје при оптичком пумпању што доводи до губитака енергије и смањења излазне снаге ласера.

Течни ласер на бази органске боје родамин 6Г емитује светлост жуте боје, таласне дужине $\lambda = 580 \text{ nm}$. Пумпање је оптичко, аргонским ласером који емитује ласерски зрак плавозелене боје $\lambda = 514 \text{ nm}$. Таласна дужина светлости течних ласера са органским бојама може се мењати континуално у ширим интервалима таласне дужине него код гасних и ласера чврстог стања, а ширина опсега таласних дужина је често (50 – 100) nm и више. На пример, течни ласер са органском бојом родамин 6Г може имати таласну дужину у интервалу од 635 nm (наранцасто-црвена боја светлости) до 560 nm (зелено-жута боја светлости) и може генерисати импулс трајања 16 fs.



Слика 11. Течни ласер на бази органске боје родамин 6Г [28]

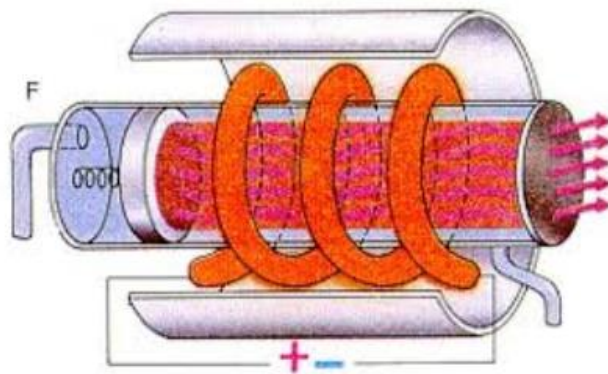
4.1.3 Ласери чврстог стања

Код ласера чврстог стања активна средина је у чврстом стању на собној температури и састоји се од кристалних или аморфних чврстих материјала, најчешће у облику шипке. На крајевима шипке су огледала тако да она заправо представља ласерску шупљину. За израду активног тела у чврстом стању најчешће се користи рубин, калцијум-молибдат, калцијум-флуорид (CaF_2), калијум-волфрамат, итријум алуминијум гранат (YAG), ербијум (Er), талијум (Tm), празеодијум (Pr), итербијум (Yb), холмијум (Ho), пластичне масе, стакло, итд. Данас се доста користи Nd:YAG (Неодимијум Итријум Алуминијум Гранат) који зрачи у блиској инфрацрвеној области на таласној дужини од 1064 nm. Предност овог ласера је у малој енергији потребној за побуђивање. Побуђивање атома ових ласера обично се изводи оптичком побудом, коришћењем ксенонске лампе, бљескалице, а у новије време и помоћу LED диоде. Ласери чврстог стања се више од других ласера користе у војне сврхе. Када је активна средина ласера чврстог стања диелектрик, побуђивање се може вршити искључиво оптичким пумпањем, односно лампом, бљескалицом.

У ласерски медијум додају се активни елементи (активатори) који убрзавају процес настанка инверзне насељености. Концентрација ових додатих елемената је обично мања од 1%. За сваки тип ласера се посебно утврђује оптимална концентрација примеса.

Избор материјала активне средине за конкретан ласер зависи од његове намене, а обично се захтева да поседује следећа својства: механичку чврстоћу, хемијску стабилност, термичку стабилност, добру прозрачност и оптичку хомогеност. Овако велики број захтева битно сужава круг материјала чија примена је могућа код ласера чврстог стања.

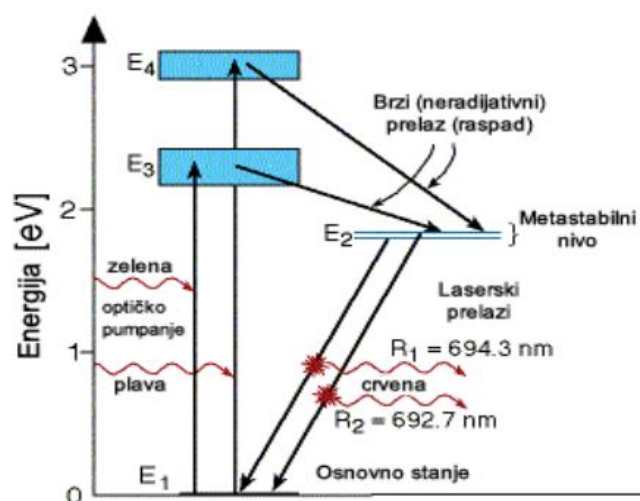
Рубински ласер је био први откривени ласер који је конструисао Т. Мејман 1960. године. Активна средина овог ласера је рубин, иначе оксид алуминијума (Al_2O_3) коме су додати атоми оксида хрома (Cr_2O_3) са процентуалним учешћем у укупној маси од 0,05%. Јони хрома, који рубину дају ружичасту боју, главни су носиоци свих процеса стимулисане емисије код рубинског ласера.



Слика 12. Приказ рубинског ласера [29]

Рубин треба да има хомогену структуру, што у комбинацији са коришћењем одговарајућих лампи за пумпање (нпр. ксенонске лампе) и при импулсном режиму рада, са кратким трајањем импулса, доводи до стварања врло велике излазне снаге ласера од више GW.

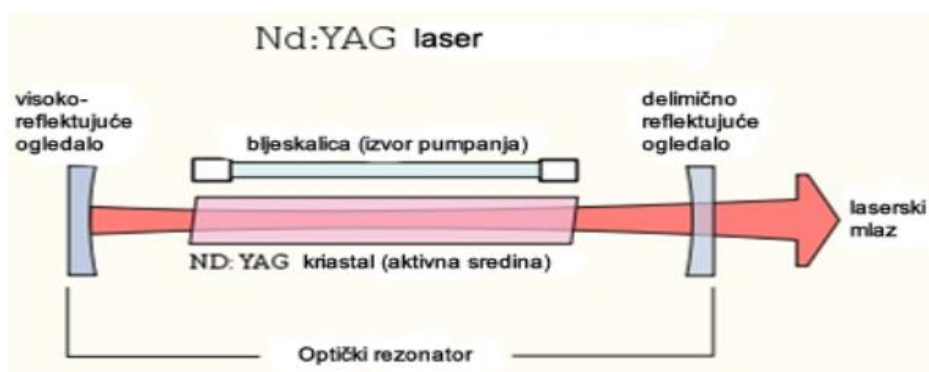
Ласерски прелаз код рубинског ласера је приказан на слици 12 и одвија се између горњег ласерског нивоа E_2 и доњег ласерског нивоа E_1 . Јони хрома Cr^{3+} се побуђују бљесковима ксенонске лампе и прелазе на побуђени ниво E_3 . Са овог нивоа јони прелазе на метастабилни ниво E_2 нерадијативним прелазима, при чему се ослобођена енергија претвара у топлотну и мора бити хлађењем одведена из система. Између нивоа E_2 и E_1 настаје инверзна популација. Рубински ласер код кога разлика између енергијских нивоа E_2 и E_1 износи 1789 eV емитује ласерску светлост црвене боје, таласне дужине 694,3 nm.



Слика 13. Приказ енергијских нивоа са прелазима код рубинског ласера [30]

Nd:YAG ласер је ласер код кога је активна средина кристал итријум-алуминијум-гранат $Y_3Al_5O_{12}$ у коме је део јона Y^{3+} замењен јонима Nd^{3+} (елеменат неодимијум-Nd припада групи ретких земаља). Учешће неодимијума у укупној маси активне средине је око 1%. Nd:YAG ласер емитује светлост у инфрацрвеном делу спектра, најчешће са таласном дужином око 1,06 μm . Поред кристала итријум-алуминијум-граната YAG, као основни материјал који се допира атомима неодимијума користи се и стакло.

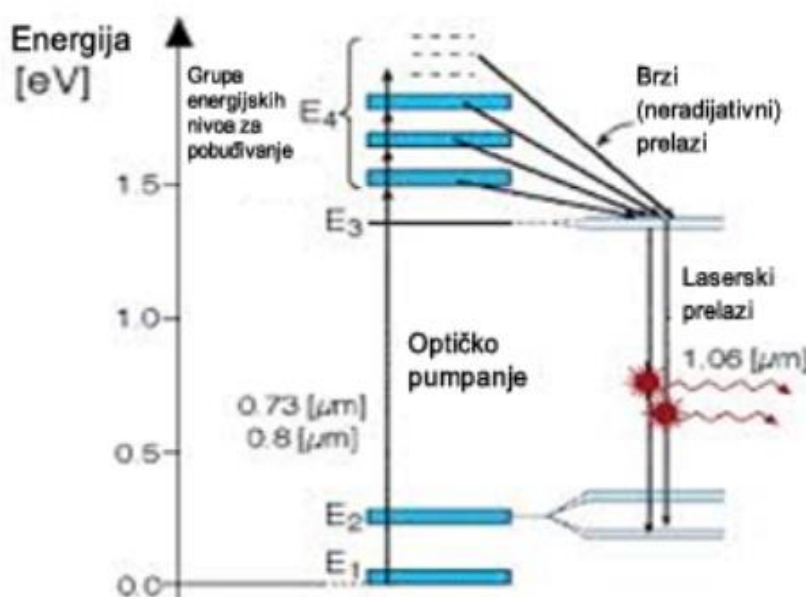
Инверзна насељеност код овог ласера настаје активношћу јона неодимијума Nd^{3+} , који подстакнути оптичком побудом доводе до стимулисане емисије и настанка ласерског зрачења. Nd:YAG је ласер са четири енергијска нивоа који су заједно са прелазима шематски приказани на слици 14.



Слика 14. Шематски приказ Nd:YAG ласера [31]

Овај ласер има добре карактеристике и може да ради како у импулсном тако и у континуалном режиму рада, с тим што се за рад у континуалном режиму користе криптонске, а за рад у импулсном режиму ксенонске лампе.

Волумен активне средине (шипке) је као код рубинског ласера, а за пумпање ласерског медијума се користе линеарне лампе са елиптичним рефлектором при чему осе лампе и шипке пролазе кроз жижне тачке елипсе.



Слика 15. Приказ енергијских нивоа са прелазима код Nd:YAG ласера [32]

Nd:стакло ласер ради на истом принципу као и Nd:YAG ласер, а разлика у карактеристикама потиче од разлика у структури активне средине, јер стакло припада групи аморфних материјала код којих концентрација Nd може бити знатно већа. Ово обезбеђује изузетно велику излазну снагу Nd:стакло ласера, највећу до сада познату.

Стакло има малу топлотну проводљивост па Nd:стакло ласери не могу да раде у континуалном режиму тако да већина ових ласера ради у импулсном режиму. Медијум активне средине код Nd:стакло ласера може имати велике димензије па је њихова излазна снага знатно већа од снаге Nd:YAG ласера и достиже вредности до неколико стотина TW, што омогућава употребу ових ласера у експериментима везаним за нуклеарну фузију.

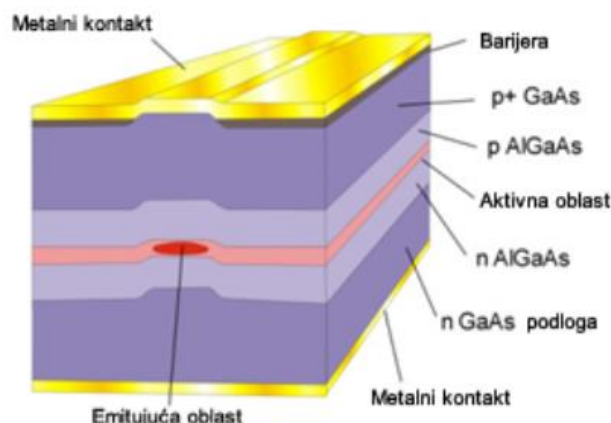
4.1.4 Полупроводнички ласери

Код полупроводничких ласера активна средина је полупроводник и у чврстом је агрегатном стању, али су издвојени у посебну групу због специфичности везаних за начин формирања инверзне насељености и процеса настанка емисије ласерског зрачења. Постоји више врста полупроводничких ласера који имају различиту структуру. Прелази код полупроводничких ласера су одређени енергијским карактеристикама материјала.

Енергијски спектар код р-п типа полупроводничких ласера се састоји од две зоне, валентне и проводне које су раздвојене посебном контактном, забрањеном зоном. Зрачење код ових ласера се формира протоком струје кроз р-п спој у коме на п страни постоји вишак електрона, а на р страни вишак шупљина, и чије особине битно утичу на рад ласера. Рекомбиновањем електрона и шупљина у контактном активном слоју, ширине мање од једног микрометра, долази до емисије фотона и настанка ласерског ефекта, односно емитовања кохерентног светлосног зрачења. Енергија фотона (боја светлости) одређена је својствима полупроводничког споја, односно износом енергијског процепа.

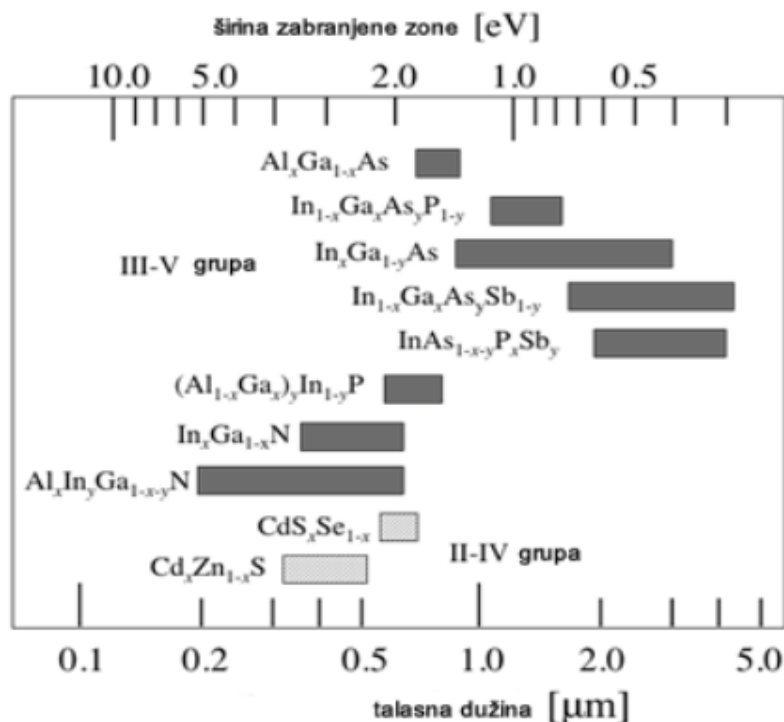
На пример за GaAs ласере, енергијски процеп износи 1,45 eV, што одговара емисији фотона таласне дужине 885 nm. Помоћу GaN, односно, AlGaIn технологије постиже се ласерски ефект у данас најзанимљивијем спектралном подручју између 400 и 500 nm (плави и љубичасти ласер). Полупроводнички материјал ZnSe омогућава израду плавозелених ласера с таласном дужином у интервалу од 490 до 528 nm. Полупроводнички материјал на бази GaAs омогућава емитовање ласерске светлости у подручју таласне дужине од 635 до 900 nm.

Код р-п типа полупроводничких ласера активна област у којој се ствара инверзна насељеност је веома мале ширине (реда величине μm) а струја прага за ласерску емисију је висока. Због мале ширине зоне активне области долази до велике дивергенције ласерског зрачења тако да велики део зрачења напушта активну област и апсорбује се у деловима полупроводника где је инверзна популација мала. Код хетероструктурних полупроводничких ласера, материјали различитих индекса преламања светлости се стављају у непосредну близину р-п споја, чиме се значајно смањује густина струје за праг ласерске емисије и повећава ефикасност ласера јер нема дивергенције зрачења у р и п областима, као што је то случај код класичних р-п ласера.



Слика 16. Двослојни хетероструктурни ласер (DH ласер) [33]

Слика 16 показује један такав двослојни хетероструктурни ласер (DH ласер-double heterostructure ласер). Код ових ласера се један слој са малом ширином забрањене зоне (нпр. галијум арсенид GaAs са $E_g = 1,42$ eV на 300 K) налази између два слоја допирана донорским (п-тип), односно акцепторским (р-тип) примесима, која имају велике ширине забрањене зоне (нпр. AlGaAs са $E_g = 1,8$ eV), што доводи до формирања енергијске баријере која задржава електроне и шупљине у активном слоју. Материјали који се стављају у близину р-п споја имају различите индексе преламања. Индекс преламања активног материјала (код GaAs је $n = 3,6$) је обично већи од индекса преламања додатог материјала (нпр. AlGaAs $n = 3,4$).



Слика 17. Опсег таласне дужине ласерске светлости двослојних хетероструктурних полупроводничких ласера [34]

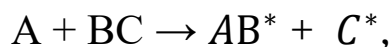
Слика 17 показује опсег таласних дужина ласерске светлости DH ласера, дебљине активног слоја $0,1 \mu m$, зависно од материјала, односно од начина допирања р и п слоја. На пример, код кристала $Al_xGa_{(1-x)}As$, могуће је подесити таласну дужину ласерске светлости у опсегу од $0,7$ до $0,9 \mu m$.

4.1.5 Хемијски ласери

Основа за функционисање хемијских ласера су хемијски процеси у активној средини ласера. За стварање инверзне насељености, као неопходног услова за рад ласера, користи се енергија која настаје приликом хемијских реакција између компонената активне средине што на крају доводи до преласка молекула у побуђено стање. Реакционе компоненте активне средине код хемијских ласера су гасови па се они могу сматрати гасним ласерима, с тим што енергија побуде код њих настаје на специфичан начин кроз хемијску реакцију реактаната, прекидом и успостављањем хемијских веза између њих. Реактанти притом, константно дотичу, а продукти излазе из система.

Предност хемијског пумпања је у томе што се енергија побуде добија самим мешањем компонената и покретањем хемијске реакције без учешћа спољњих чинилаца, осим евентуалног иницирања процеса кратким импулсом светлости.

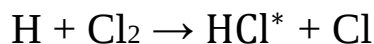
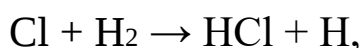
Хемијском реакцијом две компоненте општег типа може се представити модел настанка побуђених честица које касније кроз процес стимулисане емисије учествују у стварању ласерског зрачења:



где су A – атом, BC – молекул, AB^* – побуђени молекул настао хемијском реакцијом, C^* – побуђени атом настао хемијском реакцијом. Из овог примера општег типа је јасно да хемијском реакцијом долази до раскидања старих и стварања нових веза које резултирају настанком побуђених атома и молекула. Ти побуђени атоми и молекули даље учествују у процесима стимулисане емисије и формирању ласерског зрачења.

Први успешан експеримент ове врсте су извели Каспер и Пиментел користећи смешу H_2 и Cl_2 , добивши побуђене атоме хлора који су даље учествовали у стварању инверзне насељености и формирању ласерске светлости.

Хемијском реакцијом између водоника и хлора ослобађа се енергија неопходна за стварање инверзне насељености. Хемијска реакција је изгледала овако:



Побуђени молекули HCl^* учествују даље у процесу стимулисане емисије и стварању ласерске светлости на следећи начин:



Елементи који се често користе за стварање енергијске побуде код хемијских ласера су водоник (H_2) и флуор (F_2). Та смеша је експлозивна па јој се додају гасни стабилизатори у одређеном односу. Реакцијом између H_2 и F_2 долази до стварања, а затим и ексцитације молекула флуороводоника што у крајњем исходу доводи до ласерске акције. Покретање хемијске реакције се код ове смеше врши помоћу електричног пражњења. Излазна снага хемијских ласера у импулсном режиму рада достиже вредности до 3 MW.

4.1.6 Ласери са слободним електронима

Ласери са слободним електронима представљају новији тип ласера код којих се електрони у ласеру (у вакууму) крећу слободно у периодичном магнетном пољу, које наизменично мења смер дуж пута електрона. Електрони се крећу између наизменично постављених магнета чији се број и јачина магнетног поља могу мењати па тако утицати на енергију електрона. Интеракцијом електромагнетног поља и електрона долази до појаве стимулисане емисије. Фотони ухваћени између огледала изазивају стимулисану емисију слободних електрона у магнетном пољу. Од карактеристика магнетног поља и енергије електрона зависи таласна дужина ласерског зрачења, а она може бити произвољна. Интензитет зрачења је велики и може износити неколико MW/cm².

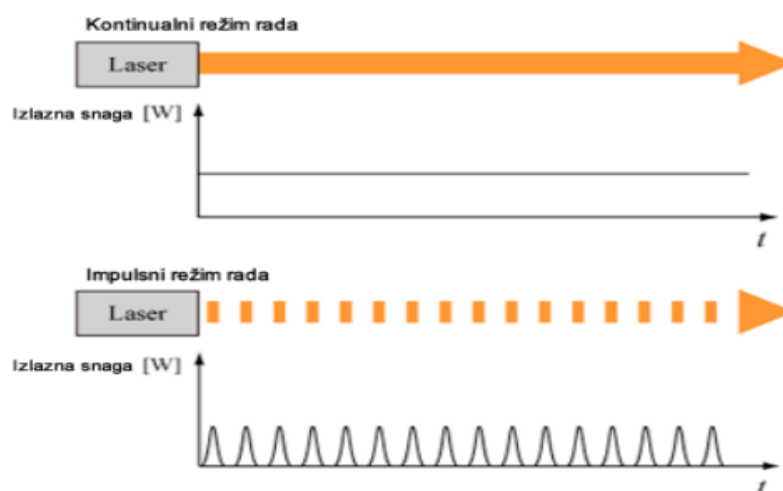
Коефицијент корисног дејства је мали (око 0,5%) па је потребно побољшати карактеристике акцелератора електрона (магнета).

4.2 Подела ласера према режиму рада

Ласери могу радити у континуалном или импулсном режиму, односно излазни сигнал може бити континуалан у времену или се састојати од периодичних импулса одређеног трајања. Због тога може се извршити подела према режиму рада на:

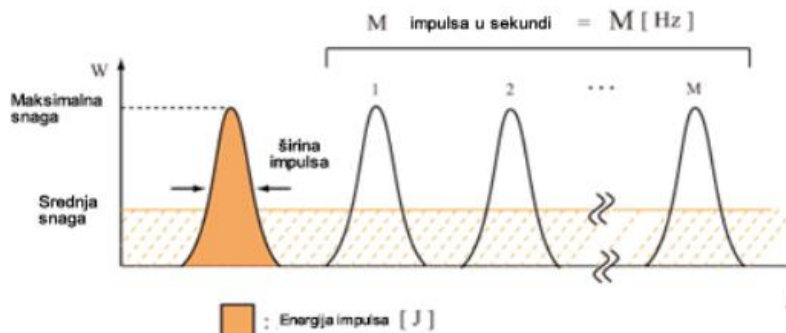
1. Континуалне ласере и
2. Импулсне ласере.

Ласер са континуалним режимом рада непрекидно емитује зрачење константне снаге, а време континуалне емисије је дуже од 0,25 s. У импулсном режимом рада емитује енергију у облику импулса константне фреквенције, а време трајања импулса је мање од 0,25 s.



Слика 18. Континуални и импулсни режим рада ласера. [35]

Импулсни режим рада ласера карактерише време трајања импулса (s), фреквенција понављања импулса (Hz), енергија импулса (J) и максимална снага (kW). Просечна снага ласера у импулсном режиму рада једнака је производу енергије импулса и фреквенције импулса, а максимална снага је једнака количнику енергије импулса и времена трајања импулса.



Слика 19. Параметри импулног режима рада ласера [36]

Q прекидање је метод када ласер може да ради како у континуалном тако и у импулсном режиму рада.

На пример, код CO_2 ласера се блокадом ласерског зрака унутар резонатора у трајању од 1 s, а затим тренутним уклањањем блокаде, постиже емитовање зрака коме је радна снага 1000 пута већа од просечне снаге у континуираном режиму рада. Трајање импулса је око 150 – 500 ns, а радна снага импулса је око 100 kW.

4.3 Подела ласера према начину побуде материјала активне средине

Једна од класификација ласера може се извршити према начину побуде активне средине. Према овој подели постоје:

1. Ласери са оптичком побудом;
2. Ласери са побудом путем електричног пражњења и сударима електрона;
3. Ласери са побудом хемијским реакцијама;
4. Ласери са побудом нуклеарним реакцијама (продуктима нуклеарних реакција).

Оптичка побуа радног тела (активне средине) се најчешће остварује коришћењем различитих типова лампи. Највише су у употреби лампе са гасовима као што је нпр. често коришћена ксенонска лампа, бљескалица. Оптички елементи за побуђивање се састоје од лампе линеарног или спиралног облика (која обухвата активну супстанцу) и полираног металног цилиндра који окружује светлеће елементе и спречава расипање светлости у околину усмеравајући је према активној средини. Метални цилиндар (рефлектор) може бити кружног или елиптичног облика.

Струјни системи за побуђивање атома активне супстанце користе се за поједине врсте ласера и карактерише их висок степен искоришћења енергије. Овакав начин побуде се примењује најчешће код полупроводничких ласера као и гасних ласера на бази угљендиоксида (CO_2). Код гасних ласера се провођењем струје кроз систем, односно кретањем електрона, успоставља процес сударне екситације који доводи до стварања инверзне насељености виших енергијских нивоа.

Код ласера са побудом хемијским реакцијама хемијски састав активног тела је такав да се хемијским реакцијама између елемената активне средине обезбеђује енергија неопходна за стварање инверзне насељености и нормалан ток настанка ласерског зрачења.

Енергија побуде настаје кроз хемијске реакције реактаната прекидом и успостављањем веза између њих.

Побуда код ласера са побудом нуклеарним реакцијама се врши помоћу честица које су продукт нуклеарних реакција. И поред техничких потешкоћа које стоје на путу реализације оваквог концепта метод се може означити као перспективан.

4.4 Подела ласера према области спектра у којој емитују светлост

Претходно наведене врсте ласера могу се класификовати и према области спектра у којој емитују светлост :

1. Ласери у видљивом делу спектра ($\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$);
2. Ласери у блиској инфрацрвеној области ($\lambda = 700 - 1400 \text{ nm}$);
3. Ласери у далекој инфрацрвеној светлости ($\lambda = 10.000 \text{ nm}$);
4. X ласери, односно ласери у X области ($\lambda = 0,01 - 1 \text{ nm}$).

У видљивој области спектра зраче аргонски ласер ($454,6 - 528,7 \text{ nm}$), криптонски ласер ($416 - 799,3 \text{ nm}$), течни ласери са бојама ($390 - 640 \text{ nm}$), рубински ласер ($694,3 \text{ nm}$) итд.

У видљивој и блиској ИЦ области спектра зраче He-Ne ласери ($632,8 - 3391,3 \text{ nm}$) итд.

У блиској ИЦ области зраче Nd:YAG ласери ($1064 - 1320 \text{ nm}$), Nd:стакло ласери (1061 nm) итд.

У далекој ИЦ области спектра зрачи CO₂ ласер ($9400 - 10.600 \text{ nm}$) итд.

У X области зраче X ласери ($0,01 - 1 \text{ nm}$).

5. Примена ласера

Због својих посебних карактеристика и широких могућности примене, ласери се користе у многим сферама живота. Различите ласере карактерише различита таласна дужина, а светлост коју емитују има различиту излазну снагу па од тога у великој мери зависи и њихова примена. Области у којима је примена ласера посебно изражена су: различите гране индустрије, нарочито војна индустрија, медицина, наука, телекомуникације, екологија, роботика, информатика, холографија, ласерска спектроскопија итд.

У индустрији су ласери нашли широку примену у обради материјала и њиховом употребом се могу изводити различити технолошки процеси. Обрада ласером базира се на коришћењу светлосне енергије у облику фотонског млаза, који наилазком на материјал узорка проузрокује његово локално топљење и испаравање. Могућа је и обрада врло тврдих па и најтврђих материјала као што је дијамант на коме се може вршити израда рељефних површина, гравирање итд. За обраду метала и неметала користе се гасни и ласери чврстог стања. Ласери се у индустрији користе посебно за: резање материјала, заваривање, локалну термичку обраду, наношење превлака, топљење, бушење малих отвора, контролу производа, мерење итд.

За резање материјала користе се гасни ласери и ласери чврстог стања. Прецизно вођење ласерског снопа је важан услов за добијање делова високе тачности па се за то користе CNC машине са тачношћу позиционирања до 10 μm . Овакав поступак обезбеђује остваривање толеранције реда величине 0,025 mm. Рез остварен на овај начин је квалитетан и ширине је око 0,15 mm. Недостатак овог поступка је немогућност резања плоча од челика дебљине веће од 20 mm. Најчешће коришћени ласери за резање материјала су гасни CO₂ ласер и ласер чврстог стања Nd:YAG ласер.

За резање су неопходне високе температуре што се остварује фокусирањем ласерског зрачења одговарајућим сочивима.

Фокусирање ласерског зрачења је могуће у кружницу пречника 0,025 – 1,0 mm, са густином снаге 10⁶ W/cm² довољне да изазове површинско топљење метала за мање од 0,1 s. Оваквим технолошким методама се омогућава рад без притиска на материјал, са високом чистоћом обрађених површина, а све важне параметре је могуће контролисати електронски. Резање материјала се може вршити ласерима у континуалном или импулсном режиму рада али се код првих постиже рез знатно вишег квалитета површине.

Постоје три основна начина резања материјала ласером:

1. ласерско резање помоћу кисеоника;
2. ласерско резање топљењем материјала;
3. ласерско резање испаравањем материјала.

Ласерско резање помоћу кисеоника је поступак који је посебно погодан за резање делова од челика (нискоугљенични и нисколегирани) чија дебљина не прелази 10 mm.

Ласерска светлост загрева материјал до температуре сагоревања након чега кисеоник у облику млаза, пратећи ласерски снап, сагорева челик издувавајући отпадни материјал из зоне резања. Потребна снага ласера за ову сврху износи од 1 – 2,5 kW и зависи од дебљине материјала. Захтевана чистоћа кисеоника је 99,95% и од ње у великој мери зависи квалитет сечене површине.

Ласерско резање топљењем материјала је метод који се састоји у резању челика (високолегирани) топљењем материјала ласером снаге 2,5 kW, при чему максимална дебљина материјала чије сечење је могуће износи 8 mm. Отпадни материјал из зоне резања се уклања дејством инертних гасова под притиском од 15 – 20 bar.

Ласерско резање испаравањем материјала је поступак којим се резање остварује тако што материјал испарава под дејством топлоте коју ствара ласерско зрачење. Млазом инертног гаса се након тога уклањају паре метала из зоне резања.

Заваривање ласером је метод који је нашао широку примену у металопрађивачкој индустрији, аутомобилској индустрији, авиоиндустрији, електроници, прецизној механици, изради накита итд.

Nd:YAG ласер је веома погодан за ову намену па се највише и користи. Заваривање, притом, може бити изведено са додавањем материјала или без тога, топљењем делова који се спајају на месту споја. Ласером је могуће, поред материјала који се лако заварују (челик), вршити и заваривање тешко заваривих материјала, као што су нерђајући челици, племенити метали (злато, сребро) и обојени метали (Al, Cu).

Приликом заваривања дебљих материјала за фокусирање ласерског зрака користе се сочива са већом жижном даљином, јер су погодна за формирање уског светлосног снопа са више енергије, а код тањих материјала (до 1 mm), сочива мање жишне даљине од 10 – 15 mm. Код заваривања различитих материјала потребно је довести оптималну количину енергије да би топљење оба материјала било истовремено, а цео поступак текао нормално.

Сваки материјал захтева посебне карактеристике ласерског снопа, као што су снага и таласна дужина, а материјал мора у радној зони бити прецизно постављен. Ласери који раде у импулсном режиму рада су погоднији за заваривање и користе се више за ову намену.

Предности ласерског заваривања су:

- квалитетан вар,
- низак ниво деформације материјала,
- могућност заваривања тешко заваривих материјала,
- могућност заваривања на местима са отежаним приступом,
- мала количина утрошене енергије.



Слика 20. Приказ три вара добијана са три различита поступка заваривања [37]



Слика 21. Приказ заваривања ласером на тешко приступачном месту [38]

Ласери су у медицини нашли широку примену пре свега као хируршка техника, али у многим областима медицине користе се и као нехируршке методе. Постоји више студија у којима су разматрани стварни ефекти ласерске терапије чији циљ је утврђивање оптималних параметара код примене ласера у медицини. Области у којима се ласери највише користе су: стоматологија, офталмологија (третмани при поремећају ока), дерматологија, ортопедија (третман костију, лигамената и мишића), оториноларингологија (третмани при поремећају уха, грла и носа), урологија, неурохирургија, онкологија (третмани канцера), пулмологија (третман код поремећаја респираторног система), гастроентерологија (третман код поремећаја гастроинтестиналног тракта) итд.

Ласер је нашао широку примену и у телекомуникацијама. Помоћу ласера, односно ласерских диода, бинарни код рачунара се претвара у светлосни сигнал који се практично без икаквих губитака оптичким кабловима преноси на велике удаљености. Оптичке каблове чини сноп оптичких влакана. Таква врста оптичког кабла повезује САД и Европу.

У роботизи се ласери користе као сензори високе тачности за одређивање положаја у простору, што омогућава позиционирање робота у складу са програмом којим су утврђени путања и друге функције робота.

Ласерска технологија има широку примену у војној индустрији, а њено коришћење се, притом, врши на исти начин као и у другим гранама индустрије (металопрерађивачка) али у складу са специфичностима које су карактеристичне за ту врсту производње.

Могућа употреба ласера у борбеним условима и евентуалној ратној ситуацији се у савременим армијама ограничава углавном на три функције, обележавање циља и нишањење, директно дејство на циљ и као средство комуникације.

До сада је развијено више система за нишањење и обележавање циља у борбеним условима и на њиховом развоју се континуирано ради. Ласерско зрачење код ових система се усмерава на циљ, одбија од њега, а затим пролази кроз процес компјутерске обраде, након чега се излазни подаци користе за употребу оружја и уништавање циља.



Слика 22. Приказ ласерског оружја [39]

Оружја која се користе за директно дејство на циљ су од посебног интереса за армије у свету јер се њиховом употребом делује у смислу неутралисања и уништења циља. Проблем код ових оружја је лош утицај атмосфере и локалних метеоролошких прилика на ласерско зрачење што битно умањује његову убојну моћ.

Ласери се користе и као средство комуникације тако што се врши модулисање сигнала који преноси информацију у ласерски сноп и обрнуто.

Предност ове методе је отежано откривање података чији се пренос врши од стране противника, а недостатак је кратак домет оваквих система (неколико километара) и негативан утицај метеоролошких услова на сигнал.

Ласер је као што је већ речено нашао примену у различитим областима, посебно када се ради о ласерском гравирању и ласерском обележавању метала. Не само мекани метали као што је алуминијум, већ и челик или врло тврде легуре такође могу прецизно, читљиво и брзо да се обележавају коришћењем ласера. У бројим производним гранама се производи који су израђени од метала обележавају путем ласера. Примена се креће од обележавања индустријски произведених серијских производа ради њихове следљивости, све до персонализације промотивних артикала са логотипом или именима.

Материјали који су погодни за ласерско:

- Нерђајући челик,
- Алуминијум,
- Ојачани метали,
- Легирани челик,
- Брзорезни челик,
- Титанијум, легуре титанијума,
- Бакар,
- Месинг,
- Драгоцени метали и др.

6. Мере заштите при раду са ласером

При раду са ласерима човек се излаже опасностима које се могу сврстати у четири категорије: зрачење, експлозија, токсичне супстанце и струјни удар.

Зрачење ласера се разликује од других врста зрачења због карактеристика светлосног снопа који је кохерентан и има далеко већу снагу по јединици површине од других природних и вештачких извора светлости. Најосетљивији орган на ласерско зрачење је људско око. Очни капци имају функцију заштите ока од зрачења и реагују затварањем на зрачење које региструје око. Оваква инстинктивна реакција није ефикасна у случају ласера јер око реагује само на видљиву светлост, а велики број ласера зрачи у блиској ИЦ области спектра, што је посебно опасно јер зрачење делује на веома малој површини ока пречника до 0,020 mm.

Оштећење ока може имати различит карактер али је опасан могући термички утицај на око који настаје код излагања ока дејству зрачења у кратком временском интервалу. Наглим повећањем температуре за само неколико степени целзијуса изнад температуре која је оптимална за функцију ока долази до оштећења виталних делова ока, а ако је ласерски зрак директно уперен у око и жута мрља може бити оштећена.

За ефикасну заштиту очију неопходно је у току рада са ласерима користити заштитне наочаре које умањују ефекат зрачења на таласној дужини ласера, а пропуштају зраке других тласних дужина. Без обзира на снагу ласера никада не треба гледати у ласерски зрак нити га управљати у нечије око. Даљиномери који користе ласере за свој рад морају имати специфицирану безбедну даљину како би се спречило негативно дејство њиховог зрачења на окружење.

Даљиномер због тога никада не треба усмерити према делу простора где се налазе људи.

Приликом рада ласера постоји могућност експлозије лампе бљескалице или пак резонаторског система са сочивима посебно код ласера чврстог стања при великим густинама зрачења. Зато је неопходно да бљескалице буду увек у кућиштима, а резонатори смештени у заштитне металне кутије.

У току рада ласера могуће је да снажно ласерско зрачење индукује хемијске реакције у ласерском медијуму и доведе до стварања токсичних супстанци у близини ласера. Зато је неопходно да се у просторијама где се ради са снажним ласерима обезбеди квалитетна вентилација.

У раду са ласером постоји и опасност од струјног удара па да би се опасност од овога свела на минимум потребно је да сви извори напајања буду прописно заштићени и уземљени.

7. Израда делова наоружања применом технологије ласерског сечења

Ласерска обрада сечењем је најраспрострањенија примена ласера у подручју обраде метала. Приликом сечења, обично је дебљина за ласерске зраке мања од 0,3 mm, а могуће је остварити дебљину сечења мању од 0,1 mm. Код сечења треба напоменути да је прво потребно избушити рупу кроз материјал, а за то се користи велика снага ласера, и траје обично 5 до 15 секунди. Приликом сечења радни сто углавном мирује и нема додатно кретање, а обрадак није потребно прејакно учврстити или у неким случајевима, није га уопште потребно учврстити.

Предност сечења ласером, у односу на класично механичко сечење, је пре свега у једноставнијем стезању радног комада као и смањење промене структуре материјала радног комада, јер код механичког резања, алат за сечење и радни комад су у додиру. Прецизност сечења је боља, будући да се ласерски зраци не троше с' временом. Смањена је и деформација радног комада након сечења, а сечење ласером ствара и малу зону утицаја топлоте (ЗУТ), где долази до промене структуре материјала и механичких својстава. Неке материјале је готово немогуће сећи на традиционални начин.

Главни недостатак је велика потрошња енергије. Индустријски ласери имају ефикасност од 5 – 15%. За стандардне индустријске процесе, као што је снага машине 1 kW и сечење лимова од 1 до 2 mm, резање ласером може бити и до 30 пута брже, у односу на класичне машине за сечење. Неопходно је још једном нагласити да применом ласера у производним процесима долази до драстичног повећања продуктивности. Производни процес сечења је у многоме убрзан, а пре свега је унапређен његов квалитет. Применом ласера у изради делова знатно је смањена количина отпада, а делови добијени ласерским сечењем су прецизнији и бољег квалитета.

У производном погону фабрике наоружања Застава оружје (Zastava arms) технологијом ласерског сечења израђују се делови сложене геометрије. Овом технологијом се знатно убрзава и појевтињује производни процес израде делова од лима и у многим ситуацијама замењује дуготрајна и скупа израда пресерских алата.



Слика 23. Ласер Прима (Prima Power Platino Fiber) из производног погона фабрике Застава оружје [40]

На слици 23, приказан је ласер произвођача *Prima Power (Platino Fiber)* који је инсталисан у производном процесу фабрике Застава оружје.

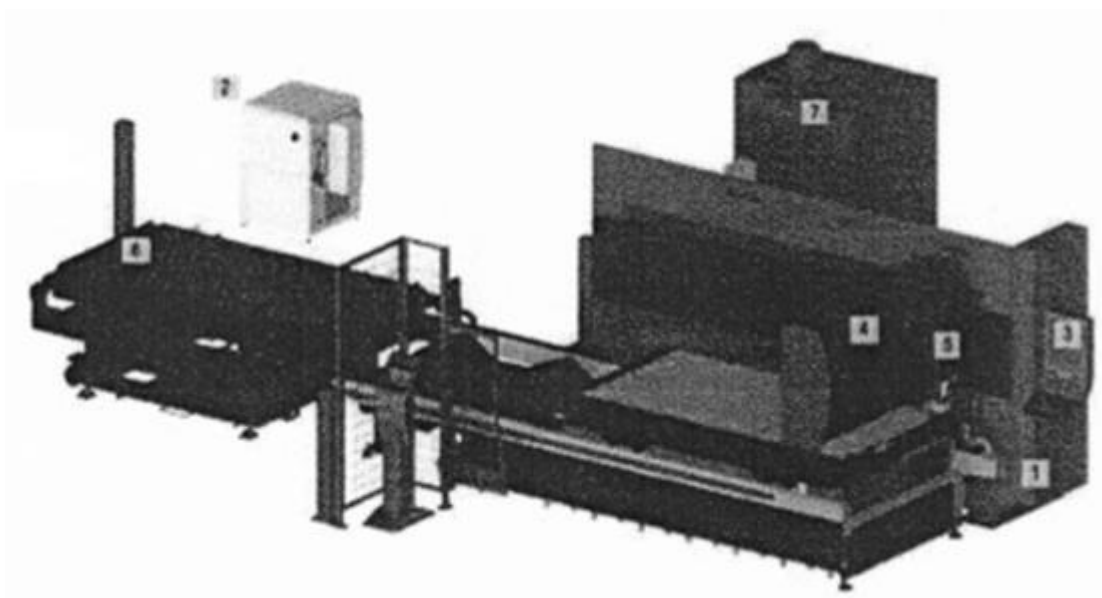
Техничке карактеристике ласерска машина за сечење *Prima Power (Platino Fiber)* ће бити представљене у наставку.

Platino Fiber ласерска машина за резање је савршен баланс иновације и искуства. *Platino Fiber* пружа поузданост и флексибилност са најразвијенијом ласерском технологијом.

Platino Fiber је развијен тако да његовим купцима буде алат који је:

- Једноставан за рад, лак за инсталацију, одржавање и коришћење.
- Широки распон материјала, *Platino Fiber* реже различите материјале и дебљине све до 25 mm конструкционог чеклика,
- Продуктивност се повећава нарочито са танким и средње-дебелим материјалима.

Основни делови машине:



1. Оквир машине
2. Ласерски генератор
3. CNC
4. Конзола рука
5. Фокусна глава
6. Систем за одсис плинова и обраде прашине

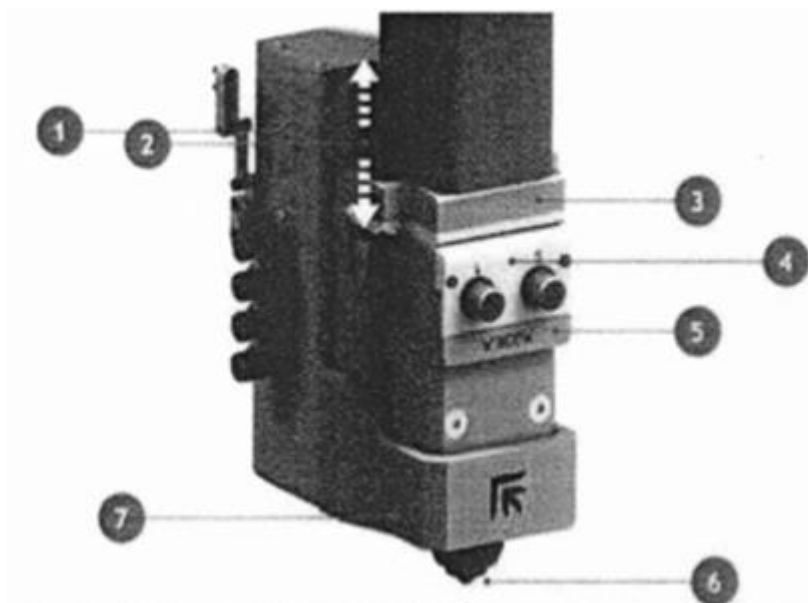
Platino Fiber је систем са летећом оптиком:

- Брзина и тачност не зависе од масе радног комада;
- Радни простор је $X=3048\text{ mm}$, $Y=1524\text{ mm}$, $Z=150\text{ mm}$;
- Потребна површина је најмања могућа узимајући у обзир ход машине;
- Има најбољу тачност на тржишту: P_a and $P_s = 0,03\text{ mm}$ (пуни ход) према VDI/DSQ 3441 стандардима (статистичко испитивање радне и позиционе тачности машинских алата) .

Platino Fiber има конзолну архитектуру:

- Потпуна приступачност на три стране;
- Могућност ручног утовара/истовара танких лимова, без коришћења без употребе аутоматског измењивача палета;
- Максимална укупна брзина од 140 m/min.

Ласерска глава за сечење са аутоматским фокусом:



1. SIF са прибором;
2. Висока динамика жаришне осе са са 35 mm хода;
3. LPM аутоматско поновно покретање ради плазме (Опција);
4. Кадице за сочива са брзим системом поравњања (ОРС);
5. Кадица за заштитно стакло за laku контролу;
6. Широко распон дизни за сваку примену, са аутоматском изменом (Опција);
7. Nitrogen piercing – Пробијање амонијаком (Опција).

Prima Power је развила нову фибер главу са прилагодљивом оптиком за аутоматско управљање фокалне позиције и дијаметра и брзо, реактивно и прецизно мерење stand-off од материјала.

Нова глава је дизајнирана за изврсан квалитет резања и динамичност на свим материјалима, највише притиске резања и најгоре услове околине (потпуно затворене и заштићене кутије).

Глава је опремљена са једним фокусним сочивом, погодна за све потребе производње. Заштитно стакло је интегрисано у за то предвођену кутију, за лакшу инспекцију. Контролишући подешавање фокусне позиције и дијаметра фокуса, флексибилност у резању различите дебљине лимова без потребе за ручним подешавањем осигурава највишу продуктивност у производњи. Фокусна позиција се измењује померањем колиматорских сочива.

Радна површина ласера: $X = 3000 \text{ mm}$, $Y = 1500 \text{ mm}$, $Z = 150 \text{ mm}$.

Максимална брзина: $X, Y = 100 \text{ m/min}$.

Максимална комбинована брзина: 140 m/min.

Линеарна резолуција осе: 0.001 mm.

Тачност:

- Позициона тачност (Pa): 0.03 mm;
- Поновљивост (Ps): 0.03 mm;

У складу са VDI/DSQ 3441 стандардима, статистичко испитивање радне и позиционе тачности машинских алата.

Сечење цеви (Опција): CNC – управљива ротациона оса за сечење округлих и правоугаоних цеви.

Максимална укупна димензија:

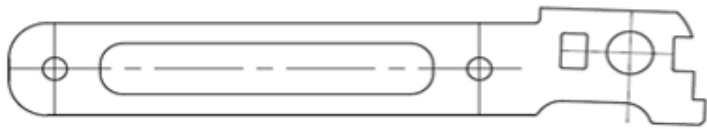
- Дужина: 10.500 mm
- Ширина: 3.400 mm
- Висина: 2.200 mm

Маса машине: 12.000 kg.

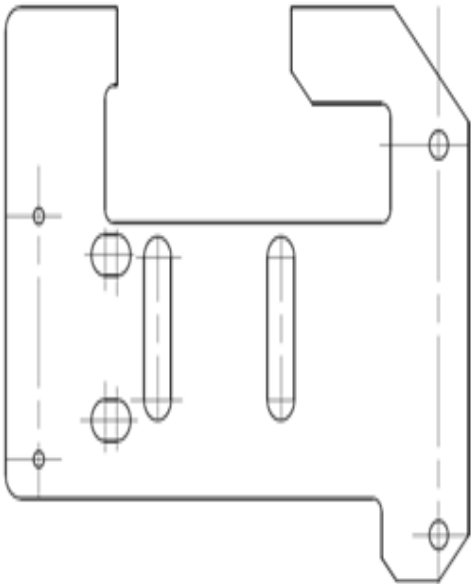
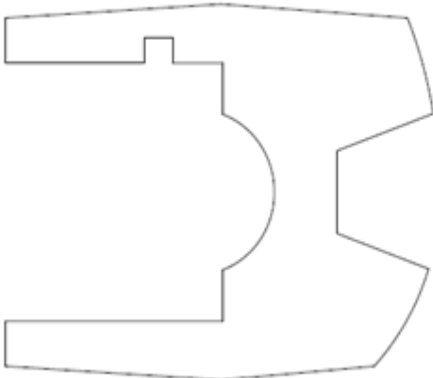
Снага стандардног *Platino Fiber* ласера: 2.000W - 5.000 W.

У табели 1, дат је преглед одређеног броја делова стрелачког наоружања који се у свом производном циклусу израђују и технологијом ласерског сечења.

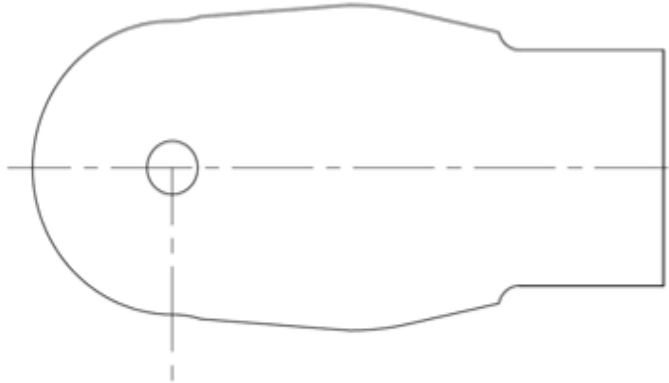
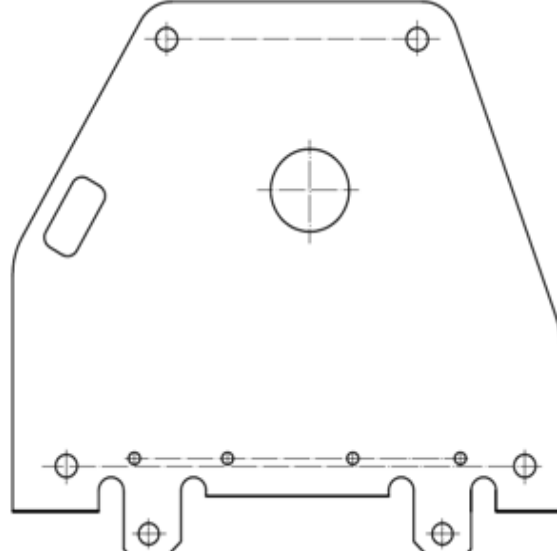
Табела 1.

Р.б	Изглед дела	Назив
1		Ручица цеви

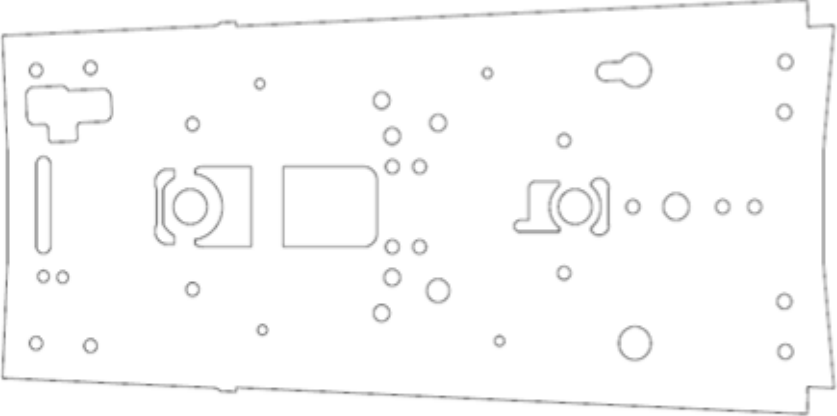
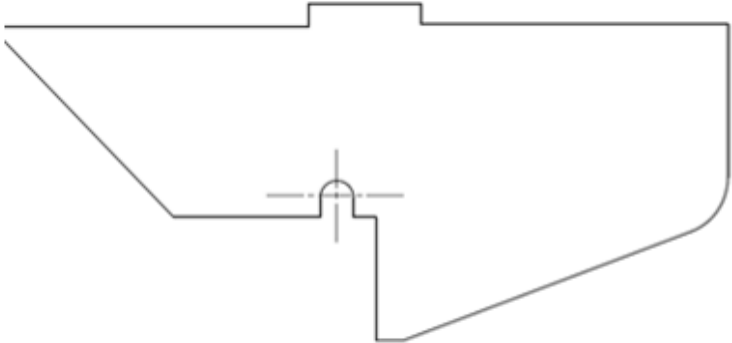
Наставак табеле 1.

2		ОСНОВА
3		Ушица усмеривача

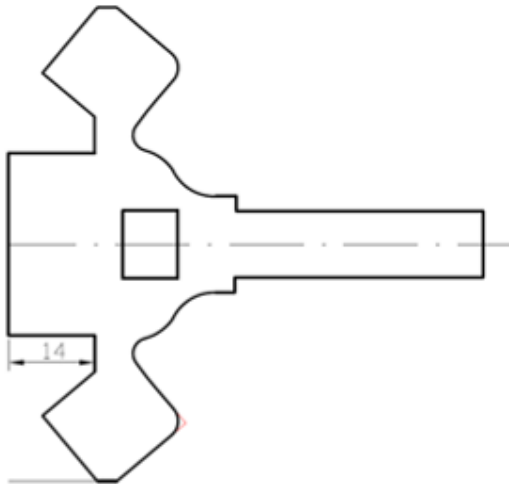
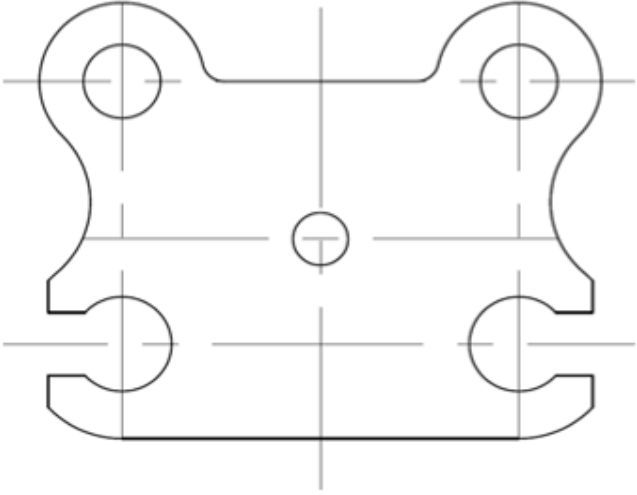
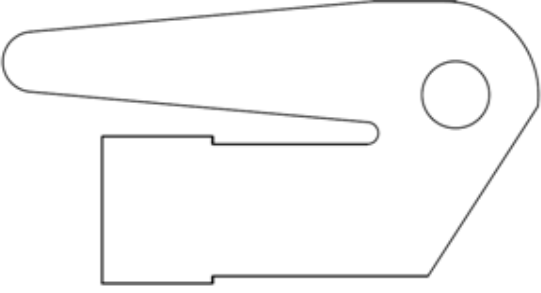
Наставак табеле 1.

4		виљушка
5		Странка лева

Наставак табеле 1.

6	 A technical drawing of a rectangular plate, likely a laser-cut part. It features a central square hole, a smaller square hole to its left, and a larger rectangular slot to its right. There are numerous circular holes of varying sizes distributed across the plate, including a row of five along the right edge and a cluster of about ten in the center-right area. The plate has irregular, slightly jagged edges.	Сандук-развијено стање
7	 A technical drawing of a complex, angular shape, possibly a laser-cut part. It has a central circular hole with a crosshair indicating its center. The shape is irregular, with a large triangular section on the left and a smaller, more complex section on the right. The edges are sharp and angular.	Страница десна

Наставак табеле 1.

8		Ојачање поклопца
9		носач
10		Опруга преносне чауре



Слика 24. Приказ готових делова добијених сечењем, применом ласера [40]

У производном погону фабрике Застава оружје (Zastava arms) се секу материјали до 10 mm. Материјал делова су конструкциони челици ознаке: С35, С60, 25CrMo4 и слични. Челик С35 спада у групу угљеничних челика за побољшање, који се примењују за израду конструкционих делова који су мање оптерећени. Челик С60 спада такође у групу угљеничних челика за побољшање и користи се за израду оптерећенијих делова. Потребно време за сечење дела „Носач” (Ознаке: ДЕО.107772) је седам секунди, у односу на класичну производњу примена ласера је смањила време израде за 45%.

Дебљина дела „Носач” је 3 mm. Потребно време за сечење дела „Ушица усмеривача” (Ознаке: ДЕО.8973) је једанаест секунди, у односу на класичну производњу примена ласера је смањила време израде за 48%. Дебљина дела „Ушица усмеривача” је 5 mm. Наведени делови су се добијали обрадом материјала деформисањем, пробијањем и сечењем. Да би се добио готов део мора се радити поступно, тачније састоји се из више операција. Ту се може приметити у коликој мери ласер повећава продуктивност и смањује време потребно за израду неког дела. Јер применом ласера у веома кратком року се добија готов део, тј. применом ласера се добијају готови делови.

Овде ће бити приказано неколико слика из производног погона, где је примењен ласер *Prima Power Platino Fiber*. Приказани ласер *Prima Power Platino Fiber* користи софтвер MAESTRO, иначе овај софтвер користи само *Прима* ласер.



Слика 25. Ласер Прима (Prima Power Platino Fiber) [40]



Слика 26. Приказ унутрашњег дела ласера, при изради делова [40]



Слика 27. Приказ дисплеја ласера Прима (Prima Power Platino Fiber) [40]

8. Закључак

У раду је представљен и теоријски и практични аспект проблематике везане за ласере и њихову примену.

Наведени су и историјски подаци по годинама о настанку ласера и развоју ласерске технике кроз време, од стварања теоријске основе па до развоја ласера са особинама које омогућавају њихову примену у свим областима људске делатности.

Развој ласерских техника и нових типова ласера тече и данас и ствара услове за коришћење и још ширу примену ласера у старим, али и новим областима у којима до сада није био присутан.

У развоју нових ласерских техника акценат је стављен на хемијске ласере због специфичног начина побуде активне средине и широких могућности за њихову употребу у космичким и другим технологијама.

Применом технологије ласерског сечења знатно се скраћује време израде делова од лима и поједстињује производња у односу на класичну технологију обраде деформисањем. Нарочито је корисна за израду прототипова и делова у малосеријској производњи. Фабрика наоружања Застава оружје је тако знатно повећала своју продуктивност и смањила трошкове у изради делова применом ласера у својим производним процесима.

Ласером се може вршити израда са високом прецизношћу и квалитетом обраде. Примена ласера на различитим пољима омогућава нам лакше, брже и ефикасније обављање послова. Ласерско сечење има више предности у односу на класичне поступке сечења материјала. Ширина реза је мала, странице реза су равне, топлотно деформисани слој је мали, могуће је сећи радни предмет по компликованим контурама са великом прецизношћу, могућа је обрада готово свих познатих врста материјала, додатна обрада није потребна, чист је и еколошки прихватљив процес обраде.

У току су истраживања везана за ласере код којих се побуда врши продуктима нуклеарних реакција код којих постоје одређене техничке потешкоће које ће у наредном периоду свакако бити превазиђене.

Литература

- 1) Henč-Bartolić V, Bistričić L, - *Predavanja i auditorne vježbe iz fizike lasera*, Element, Zagreb, 2001.
- 2) <https://sr.wikipedia.org/wiki/Ласер#Историјат> (Преузето 19.08.2019.)
- 3) Koechner W, Bass M, - *Solid-State Lasers: A Graduate Text*, Springer Verlag, New York, 2003.
- 4) Konjević N, *Lasери sa promenljivom talasnom dužinom*, Sveske fizičkih nauka, SFIN, Beograd, 1993.
- 5) Konjević N, *Laserska spektroskopija*, Savremena istraživanja u fizici II, Institut za fiziku, Beograd i Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- 6) Konjević N, - *Uvod u kvantnu elektroniku - Lasери*, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- 7) Lugomir S, Stipančić M, - *LASERI - Fizikalne osnove, konstrukcija i primjena*, IGKRO "Svjetlost" - OOUR Zavod za udžbenike, Sarajevo, 1977.
- 8) Marinčić A, - *Lasери i optoelektronika*, Tehnička knjiga, Beograd, 1987.
- 9) Marković V, - *Fizika jonizovanih gasova*, Niš, 2004.
- 10) Martinovski V i Antić M, *Noviteti u termičkim postupcima rezanja*, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 3 (2011).
- 11) Meschede D, - *Optics, Light and Laser*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KgaAICCM, Weinheim, 2007.
- 12) Peng Q et al. - *Laser in medicine*, Rep. Prog. Phys. **71** (2008)
- 13) Renk K. F, - *Basics of Laser Physics*, Springer International Publishing, 2012.
- 14) Siegman A. E, - *Lasers*, University Science Books Sausalito, California, 1986.
- 15) Svanberg S, - *Atomic and molecular spectroscopy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001.
- 16) Svelto O, - *Principles of lasers*, Springer Science & Business Media, 2010.
- 17) Paschotta R, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
- 18) <https://sr.wikipedia.org/wiki/Ласер> (Преузето 04.09.2019.)
- 19) https://ethw.org/Theodore_Maiman_and_the_Laser (Преузето 01.09.2019.)
- 20) https://ethw.org/Theodore_Maiman_and_the_Laser (Преузето 04.09.2019.)

- 21) <https://dokumen.tips/documents/obrada-laserom.html> (Преузето 05.09.2019.)
- 22) <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html#rubinski> (Преузето 04.09.2019.)
- 23) <https://www.repairfaq.org/sam/laserhtr.htm> (Преузето 06.08.2019.)
- 24) https://www.rp-photonics.com/brewster_windows.html (Преузето 05.08.2019.)
- 25) <https://laserscn.wordpress.com/> (Преузето 01.08.2019.)
- 26) laser.photoniction.com/tutorial/Fig.4.2.4. (Преузето 02.08.2019.)
- 27) <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-an-excimer-laser/> (Преузето 01.09.2019.)
- 28) https://en.wikipedia.org/wiki/Dye_laser (Преузето 02.08.2019.)
- 29) <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html#rubinski> (Преузето 03.08.2019.)
- 30) <https://perg.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/>(Rami Arieli: "The Laser Adventure") (Преузето 02.09.2019.)
- 31) https://sh.wikipedia.org/wiki/Gra%C4%91a_lasera (Преузето 01.08.2019.)
- 32) <https://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/Ch-6/F6s2t2p2.htm>(Rami Arieli: "The Laser Adventure") (Преузето 02.08.2019.)
- 33) <http://britneyspears.ac/physics/fplasers/fplasers.htm> (Преузето 03.09.2019.)
- 34) <http://ldselection.com/tutorial/basics-of-laser-diode/chapter1-basics-of-laser-diode/> (Преузето 03.08.2019.)
- 35) laser.photoniction.com/tutorial/Fig.1.1.2. (Преузето 02.08.2019.)
- 36) laser.photoniction.com/tutorial/Fig.1.1.3. (Преузето 02.08.2019.)
- 37) <http://www.laserskovarenje.com.hr/index.php/lasersko-zavarivanje> (Преузето 02.08.2019.)
- 38) <http://www.laserskovarenje.com.hr/index.php/lasersko-zavarivanje> (Преузето 02.08.2019.)
- 39) <http://www.zerohedge.com/news/2016-06-27/us-navy-begin-testing-powerful-150-kilowatt-laser-weapon-system> (Преузето 02.08.2019.)
- 40) Слика 23, Слика 24 , Слика 25, Слика 26, Слика 27 – Сликане у производном погону фабрике Застава оружје.