

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Bakalářská práce**

**CNC řezací stroj s technologií laserového paprsku**

**Martin Maršík**

© 2022/2023 ČZU v Praze

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

Technická fakulta

# **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Martin Maršík

Procesní inženýrství  
Technologická zařízení staveb

Název práce

**CNC řezací stroj s technologií laserového paprsku**

Název anglicky

**CNC cutting machine with laser beam technology**

---

## **Cíle práce**

- shromáždit literární poznatky o možnostech a metodách dělení materiálů se zaměřením na řezání laserem,
- shromáždit informace o konstrukci a provedení hobby laseru.

## **Metodika**

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

### Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

### Klíčová slova

dělení materiálů, řezání laserem, konstrukce, pojezdy, vedení paprsku

---

### Doporučené zdroje informací

- BARR, E. (VOGELE, T., Editor): Professional sheet metal fabrication. Osceola, Motorbooks International 2013. 304.
- BROŽEK, M.: Steel cutting using abrasive water jet. 16th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development. Jelgava, Latvia University of Agriculture 2017. 75-81.
- CARISTAN, Ch. L.: Laser cutting guide for manufacturing. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Michigan 2004. 447.
- Časopisy zahraniční (<https://www.sic.czu.cz/cs/r-8833-odborne-databaze/r-8883-infozdroje>) a tuzemské (Manufacturing Technology, MM Průmyslové spektrum, SDSM (Svařování, dělení, spojování materiálů), Strojírenská technologie, Strojárstvo / Strojírenství, Svět svaru, Technický týdeník, Zváranie / Svařování).
- JAHAN, M. P. (Editors): Electrical discharge machining (EDM): types, technologies and applications. New York, Nova science publishers 2015. 513.
- KIM, S. I., KIM, M. H.: Evaluation of cutting characterization in plasma cutting of thick steel ship plates. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 14, 9, 2013. 1571-1575.
- KMEC, J., KUČERKA, D., GOMBÁR, M., HRMO, R., BIČEJOVÁ, L.: Delenie materiálov. 2. vydání. Košice, Technická univerzita v Košiciach 2014. 287.
- MAŇKOVÁ, I.: Progresívne technológie. Košice, TU SF Edícia vedeckej a odbornej literatúry, Viena, vydavateľstvo a tlačiareň 2000. 275 s.
- RIVEIRO, A., QUINTERO, F., del VAL, J. et al.: Laser cutting of aluminum alloy Al-2024-T3. Procedia Manufacturing, 13, 2017. 396-401.
- STEEN, W. M.: Laser material processing. 3rd Ed., London, Springer 2003. 408 s.
- 

### Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

### Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

### Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2021

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 04. 03. 2023

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " CNC řezací stroj s technologií laserového paprsku " jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2023

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Milanovi Brožkovi, CSc., za odborné vedení bakalářské práce.

# CNC řezací stroj s technologií laserového paprsku

## Abstrakt

Tato práce se v první polovině bude věnovat seznámení technologie laserových paprsků. Zpočátku začíná historií vzniku laserového paprsku, které dále plynule přechází k popsání samotného principu a vysvětlení, jak vlastně vzniká světelný paprsek. Seznámíme se také se základními vlastnostmi paprsku, které pomohou pochopit princip funkce interakce s materiálem a přejdeme k rozdělení laserů dle různých kritérií. Následuje popis metod řezání různých typů materiálů a vysvětlení, jak při těchto metodách probíhá úběr materiálu.

V druhé polovině práce se podíváme konstrukce strojů dostupných na trhu. Tyto stroje si popíšeme a zařadíme do kategorií. Řekneme si jejich výhody a nevýhody a na co jsou vhodné. V závěrečné kapitole si CNC řezací stroj rozdělíme po částech a budeme řešit jednotlivé části laseru, abychom si ukázali, z čeho se tyto stroje skládají, jaké jsou možnosti, a co by u takového stroje nemělo chybět, když by došlo na samotnou konstrukci. Nejprve začneme výběrem vhodného laseru pro stroj v domácích podmínkách, na kterou navazuje chlazení a ostatní součásti nutné pro to, aby byl zaručen bezproblémový chod. Následují části, ze kterých se CNC systém skládá a také materiál, ze kterého by mohlo být vyrobeno opláštění stroje podle vybraného laseru, aby byl stroj bezpečný pro uživatele.

**Klíčová slova:** dělení materiálu, řezání laserem, konstrukce, pojezdy, vedení paprsku, lineární vedení

# **CNC cutting machine with laser beam technology**

## **Abstract**

This work in the first half will focus on introducing the technology of laser beams. It begins with the history of the creation of laser beams, which smoothly transitions to the description of the principle itself and an explanation of how a light beam is actually created. We will also become familiar with the basic properties of the beam, which will help us understand the principle of interaction with the material, and then we will move on to the division of lasers according to various criteria. This is followed by a description of methods for cutting various types of materials and an explanation of how material removal takes place in these methods.

In the second half of the work, we will look at the construction of machines available on the market. We will describe these machines and categorize them. We will discuss their advantages and disadvantages and what they are suitable for. In the final chapter, we will divide the CNC cutting machine into parts and address the individual parts of the laser to show what these machines are made of, what the possibilities are, and what should not be missing when it comes to construction. First, we will start with the selection of a suitable laser for a machine in domestic conditions, followed by cooling and other components necessary to ensure smooth operation. This is followed by the parts that make up the CNC system, as well as the material that could be used to make the machine casing according to the selected laser to ensure safety for the user.

**Keywords:** material splitting, laser cutting, construction, carriages, beam guidance, linear guidance

# Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>Cíl práce a metodika.....</b>	<b>2</b>
<b>Laser.....</b>	<b>3</b>
1.1 Historie.....	3
1.2 Princip vzniku záření.....	4
1.3 Vznik laserového paprsku.....	7
1.4 Vlastnosti laserového paprsku.....	8
1.4.1 Vlnová délka a frekvence .....	8
1.4.2 Výkon laserů .....	9
1.4.3 Vhodný laserový mód pro řezání .....	11
<b>Dělení laserů .....</b>	<b>14</b>
1.5 Dělení dle aktivního média .....	14
1.5.1 Plynové .....	14
1.5.2 Pevnolátkové.....	16
1.5.3 Polovodičové .....	17
1.5.4 Vláknové lasery .....	18
1.5.5 Kapalinové lasery .....	19
1.6 Dělení dle výstupního výkonu .....	19
1.7 Dělení dle vlnové délky .....	20
1.8 Dělení dle provozního režimu.....	21
1.9 Dělení dle zdroje excitace .....	22
<b>Interakce paprsku s materiálem.....</b>	<b>22</b>
1.10 Metody řezání.....	24
1.10.1 Řezání odpařováním .....	24
1.10.2 Řezání natavením a odfukem.....	25
1.10.3 Praskání tepelným napětím.....	26
1.10.4 Gravírování .....	26
1.10.5 Laserové rýhování.....	27
1.10.6 Studené řezání .....	27
<b>Konstrukce .....</b>	<b>28</b>
1.11 Druhy konstrukcí.....	28
1.11.1 Nejmenší laserové gravírovací stroje.....	28
1.11.2 Malé laserové stroje .....	29
1.11.3 Malé uzavřené laserové stroje.....	30
1.11.4 Středně výkonné laserové stroje .....	30
1.12 Konstrukční řešení .....	32



1.12.1	Výběr laseru.....	32
1.12.2	Porovnání CO2 laserů.....	33
1.12.3	Vedení paprsku .....	35
1.12.4	Řezací hlava.....	35
1.12.5	Chlazení .....	35
1.12.6	Rozměry stroje.....	37
1.12.7	Kompresor .....	38
1.12.8	Zdroj pro DC CO2 laser.....	38
1.12.9	Motory .....	38
1.12.10	Pojezdy.....	39
1.12.11	Pohon .....	39
1.12.12	Opláštění stroje .....	39
1.12.13	Odsávání .....	40
1.12.14	Doplňky .....	40
<b>Závěr</b>	.....	<b>41</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	.....	<b>42</b>

## Seznam obrázků

Obr 1 Model atomu [25] .....	4
Obr 2 Ukázka absorpce a emise záření [26] .....	5
Obr 3 Porovnání rozdílu mezi spontánní a stimulovanou emisí [1] .....	6
Obr 4 Průběh vzniku laserového paprsku v rezonátoru [7] .....	8
Obr 5 TEM mody paprsků [7] .....	10
Obr 6 TEM módy paprsků [7] .....	10
Obr 7 Znárodnění tvaru intenzity paprsku na Gaussově křivce [1] .....	11
Obr 8 Porovnání módů na Gaussově křivce [7] .....	11
Obr 9 Znárodnění rozbíhavosti (divergence) paprsku [1] .....	12
Obr 10 Buzení průchodem elektrického proudu [7] .....	15
Obr 11 Modul laserové diody [27] .....	17
Obr 12 Diagram aktivního prostředí diody [28] .....	18
Obr 13 Čerpání vláknového laseru metodou přes plášť [29] .....	19
Obr 14 Vlnové délky v závislosti na použitém aktivním prostředí [30] .....	20
Obr 15 Princip mode lockingu [18] .....	21
Obr 16 Přechod paprsku ze vzduchu do materiálu [7] .....	22
Obr 17 Pohltivost kovových materiálů v závislosti na vlnové délce [31] .....	23
Obr 18 Řezání s odfukem [7] .....	25
Obr 19 Detailní pohled na gravírování .....	117
Obr 20 Nejmenší gravírovací stroj beze dna [11] .....	118
Obr 21 Konstrukce malého laserového stroje [1] .....	129
Obr 22 Konstrukce malého uzavřeného stroje [16] .....	15
Obr 23 Konstrukce středně velkého gravírovacího stroje [17] .....	31
Obr 24 Parametry 100 W DC CO <sub>2</sub> laserové trubice [32] .....	36
Obr 25 Parametry 100 W RF CO <sub>2</sub> laserové trubice [33] .....	23
Obr 26 Domek lineárního vedení [22] .....	39
Obr 27 Systém kolejnic lineárního vedení [23] .....	39
Obr 28 Beam combiner [34] .....	23

# Úvod

Laserové technologie jsou mezi námi už více jak půl století a za tu dobu pokročili na takovou úroveň využití, že se dnes bez nich prakticky nelze představit svět jaký známe. Nehledě na nespočet využití, které různé druhy laserů mají, právě dělení materiálů laserem je odvětví, které nás v této práci bude zajímat nejvíce.

CNC řezací stroje s laserovým paprskem se řadí mezi nejvýkonnější a nejefektivnější nástroje pro zpracování různých materiálů, jako jsou dřevo, plast, kůže a kovy, a to s minimálním odpadem, vysokou efektivitou práce a velikou přesností řezu.

Tyto stroje byly původně určeny pro průmyslové použití, nicméně v posledních letech však na trh přichází mnoho různých verzí, pro použití běžným uživatelem v domácích podmínkách. Také na trh přichází laserové technologie za přijatelnou cenu, které pomohou si takovýto stroj postavit i klidně v domácích podmínkách. Cílem této práce je seznámení s funkcí laserů a laserového řezání a jejich podmínkám k tomu, aby bylo možné řezat materiály i v domácích podmínkách, jelikož je laserová technologie poměrně složitá, práce se bude snažit vysvětlit, podle čeho vybrat vhodný laser pro použití, které bychom sami potřebovali.

Typů těchto laserů je mnoho, ovšem ty, které mohou řezat největší škálu materiálů je jen hrstka a většinou cena převyšuje stovky tisíc. Jelikož půjde i seznámení s konstrukcí, je věnována pozornost i jednotlivým částem konstrukce laserům, které by byly problému schopny řezat největší škálu materiálů.

Motivací pro to věnovat se tomuto tématu je bezesporu záliba v této fascinující technologii a touha po tom, zjistit, jak princip dělení materiálu vůbec probíhá. Možnosti, které dnes na trhu s lasery jsou mě zajisté motivují k tomu, sestavit si laserový stroj a postupně zlepšovat jeho funkce.

## **Cíl práce a metodika**

Hlavním cílem této bakalářské práce je poskytnout ucelený přehled o CNC laserových řezácích a jejich použití v současném světě. Práce bude zaměřena na popis vzniku laserového paprsku, jeho vlastnosti, dělení laserů, interakce paprsku s materiálem a přehled již existujících konstrukcí na trhu. Dále bude práce popisovat jednotlivé části CNC stroje, jejich funkci a možnosti při volbě konstrukce hobby laseru, na kterých zároveň bude popsán princip, jak stroje fungují.

Pro dosažení cílů bakalářské práce bude použita literární rešerše, která zahrnuje prohledání odborných publikací, vědeckých článků a internetových zdrojů. Práce se bude věnovat detailněji informacím, které by mohly přispět k pochopení, jak může být laserový stroj schopný provozu v domácích podmínkách a na čem volba jednotlivých komponentů konstrukce závisí a co by bylo vhodné zakomponovat do takového to stroje.

# Laser

Slovo LASER vzniklo jako akronym anglických slov popisujících vznik tohoto paprsku. Označení v angličtině zní – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation neboli v doslovném překladu – zesílení světla pomocí stimulované emise záření, někdy ve vědeckých kruzích označován jednoduše jako generátor světla.[2]

Jako laser se z hlediska fyziky používá pro označení zařízení, které generuje světelný paprsek, nikoliv však paprsek samotný, což se velmi často zaměňuje.[2]

## 1.1 Historie

- V roce 1917 Albert Einstein publikoval svou teorii stimulované emise, což byla základní myšlenka pro vznik laseru. Tento princip popisuje, jakým způsobem může světlo způsobit emisi fotonů, které jsou vysílány koherentním způsobem.[3], [4]
  - V roce 1954 Charles H. Townes a jeho studenti James P. Gordon a Herbert J. Zeiger vynalezli první maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), který byl založen na principu stimulované emise a využíval mikrovlnné vlnové délky. Tento vynález byl předchůdcem laseru.[3], [4]
  - V roce 1958 Townes, Arthur Schawlow a jejich kolega Nikolay Basov navrhli použití optických vlnových délek pro vytvoření koherentního zdroje světla. Schawlow a Townes také navrhli první optický maser.[3], [4]
  - V roce 1960 Theodore H. Maiman vynalezl první laser pomocí syntetického rubínu. Tento laser produkoval pulzy koherentního světla v oblasti viditelného světla a byl prvním laserem, který byl prakticky použitelný.[3], [4]
  - V roce 1962 byl vynalezen první plynový laser, který používal oxid uhličitý jako médium. Tento laser byl mnohem výkonnější než pevný laser a umožnil široké využití laserové technologie v průmyslu.[3], [4]
  - V roce 1964 byla objevena možnost využití laserů k optické komunikaci. Laserové světlo se ukázalo být ideálním pro přenos informací rychlostí téměř světelné rychlosti a optická komunikace se stala hlavní oblastí využití laserů.[3], [4]
- Zároveň se i začátkem tohoto roku laser poprvé objevil ve filmovém průmyslu, a to konkrétně ve filmu James Bond 007 Goldfinger, kde laserem scénáristé nahradili

původní kotoučovou pilu, jako zbraň, kterou záporák použil na hrdinu filmu, aby snímky byly více dechberoucí. [5]

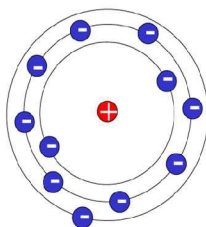
- V 70. a 80. letech byly vyvinuty nové typy laserů, včetně diodových laserů a různých druhů pevných laserů. Tyto nové typy laserů umožnily výrazně zlepšit výkon a efektivitu laserových systémů.[3], [4]
- V posledních desetiletích se výzkum v oblasti laserů zaměřuje na vývoj nových materiálů pro laserová média, na vývoj nových technologií pro využití laserů v průmyslu a na vývoj nových aplikací.[3], [4]

## 1.2 Princip vzniku záření

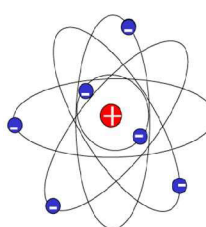
Abychom porozuměli tomu, jak paprsek vzniká, musíme nahlédnout do kvantové fyziky. Pokud se podíváme na zjednodušený model atomu na obr. 1, tak vidíme jádro (protony a neutrony) a okolo po svých uzavřených drahách obíhají elektrony. Pro každou dráhu je specifické určité množství energie. Platí, že elektrony, které jsou blíže k jádru, jsou k jádru přitahovány elektrostatickou silou. Elektrony mají záporný a jádro kladný náboj, nicméně elektrony jsou zároveň odpuzovány jinými elektrony v atomu právě proto, že všechny elektrony mají stejný náboj. Elektron tedy obíhá po dráze ve vzdálenosti, která je dána kompromisem těchto dvou sil. Platí, že čím je dráha dále od jádra, tím více energie má, a to platí samozřejmě i opačně. Podle toho se tyto dráhy nazývají energetickými hladinami.[2], [4], [6]

Obr 1 Model atomu [25]

Bohrův model



Sommerfeldův model



V základním stavu elektrony obíhají po hladinách, které jsou jejich základní, ve stavu s nejmenší energií. Tomuto stavu se říká základní energetická úroveň. Když se však elektrony nenachází v této základní energetické úrovni, mohou přejít na vyšší energetickou hladinu. Zde však platí pravidlo, že se mohou pohybovat pouze po energetických hladinách. Nelze tedy docílit stavu, kdy bude elektron obíhat mezi těmito hladinami. Z toho je patrné, že přechody mezi těmito hladinami lze uskutečnit pouze přeskokem z jedné hladiny do druhé, a nikoliv však plynulým přechodem.[2], [4], [6]

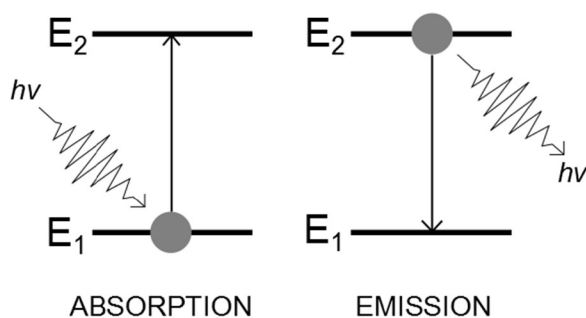
Nyní přejdeme k vysvětlení dvou základních pojmů a tím jsou absorpce a emise, které můžeme vidět na obr. 2.

Absorpce a vzniká, když atom získává energii dodávanou z okolí. Opak absorpce je emise, kdy se atom naopak zbavuje energie v podobě kvant (fotonů).[2], [6], [7]

Představme si nyní, že máme model atomu, který má pouze dvě energetické hladiny. Na atom aplikujeme hodně energie v podobě tepla, světla nebo elektřiny a díky tomu, že elektron absorboval energii, může opustit základní energetickou úroveň a přejít na excitovanou úroveň, což jednoduše znamená, že se některé elektrony přesunou na vyšší energetickou hladinu. Tomu se také říká, že je elektron excitován.

Nachází-li se elektron v excitovaném stavu, dochází s jistou pravděpodobností k emisi. To, jak dlouho elektron setrvá v excitovaném stavu není nikdy přesně známo.[2], [4]

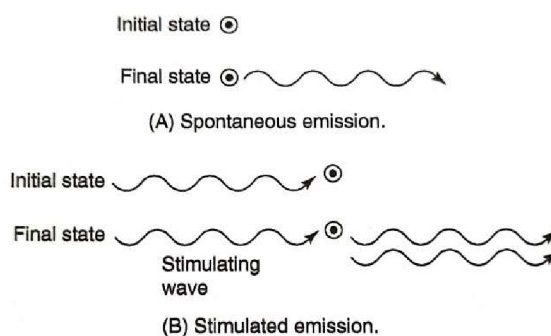
Obr 10 Ukázka absorpce a emise záření [26]



Zde rozlišujeme dva další pojmy a tím je emise spontánní, kdy elektron samovolně přejde z excitované úrovně na úroveň základní a druhým je stimulovaná emise.

Vysvětleme si to na příkladu, kdy máme dva atomy stejného prvku. Když se foton, uvolněný spontánní emisí z “atomu jedna” setká nebo proletí kolem atomu druhého, jehož elektrony jsou v excitovaném stavu, dochází k jevu, kdy je druhý atom popohnán, nebo spíše přinucen k vyzáření dalšího fotonu o stejné energii a směru, jako foton, který emisí způsobil. Nyní tedy máme dva fotony o stejné vlnové délce letící stejným směrem. To, že foton prvního atomu vynutí emisí druhého atomu nazýváme stimulovanou emisí. Grafické znázornění na obr. 3. [2], [6]

Obr 19 Porovnání rozdílu mezi spontánní a stimulovanou emisí [2]



Vysvětlení proběhlo na příkladu, kdy elektrony excitují pouze mezi dvěma hladinami. Nicméně, elektrony mohou excitovat o dvě až tři hladiny v závislosti na materiálu aktivního prostředí. Když se pak atom zbavuje energie, hovoříme také o relaxaci. Při této relaxaci atom vydá foton světla s energií odpovídající rozdílu energií mezi hladinami. Neznamena to tedy, že za každou hladinu, kterou elektron skokově přejde, se vyzáří jeden foton, nýbrž poskočí o všechny hladiny najednou na základní úroveň, a přitom vydá foton o energii, která bude odpovídat rozdílu energií těchto hladin. To poté ovlivňuje vlastnosti tohoto světla. Když se energie světla zvyšuje, vlnová délka klesá a frekvence se zvyšuje.[2], [6], [8]



### 1.3 Vznik laserového paprsku

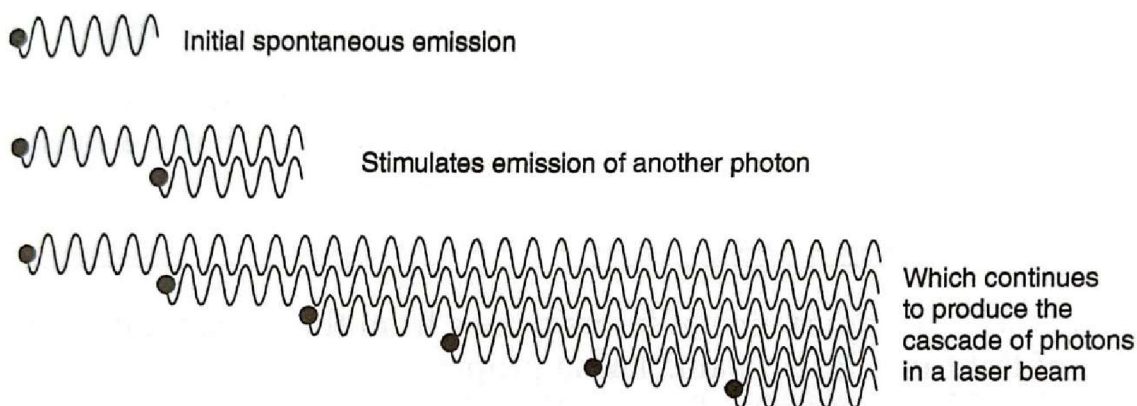
Pokud tedy známe princip, jakým vzniká stimulovaná emise, můžeme se nyní pustit do vysvětlení funkce laseru. Jelikož však na světě vzniklo spousta druhů laserů dle potřeby použití a některé konstrukce jsou pro nás nepodstatné, vysvětlíme si základní princip vzniku laserového paprsku, abychom zjistili, jak funguje a poté si v následujících kapitolách vysvětlíme detailně funkce vzniku laserových paprsků, které se budou hodit svými vlastnostmi pro naši aplikaci.

**Základem jsou tři hlavní komponenty:**

- **Optický rezonátor** – v tomto případě dvě zrcadla řazená paralelně, přičemž jedno je zcela nepropustné a druhé z části propustné.
- **Aktivní prostředí** – To je látka, která generuje světlo. Různé druhy si popíšeme v dalších kapitolách. Toto prostředí se nachází mezi zrcadly.
- **Zdroj excitace** – to je zařízení, které dodává do systému energii a díky tomu mohou atomy aktivního prostředí excitovat.[2], [6]

Základní laser se skládá ze dvou zrcadel, jedno je nepropustné a druhé je polopropustné. Tato zrcadla jsou umístěna paralelně k sobě, aby vytvořila optický rezonátor, tedy komoru, ve které by světlo putující mezi zrcadly neustále pohybovalo tam a zpět. Mezi zrcadly je aktivní prostředí, které má za úkol zesilovat sílu paprsku tím, že průchodem fotonu tímto prostředím stimulovanou emisí strhává další fotony, které pak také rezonují mezi zrcadly.[2]–[4], [8]

Dále musíme mít nějaký zdroj excitace, který nám pomáhá k absorpci energie elektrony, jak bylo zmíněno v předchozí kapitole. K tomu se používá zdroj v podobě elektrického výboje (plynové lasery), optické pumpy (především pevnolátkové lasery), diod (polovodičové lasery) anebo také chemické reakce (některé CO<sub>2</sub> lasery). Když tedy zdroj vybudí aktivní prostředí, fotony začnou rezonovat mezi zrcadly, přičemž s sebou strhávají další a další fotony, viz obr. 4. Když je paprsek dostatečně silný, dostane se skrze polopropustné zrcadlo ven v podobě laserového paprsku.[6], [8]



## 1.4 Vlastnosti laserového paprsku

Praktický význam laserů pochází z neobvyklých vlastností světla laserového paprsku. Tyto vlastnosti jsou naprosto klíčové pro správnou aplikaci laserů, počínaje řezáním plastových či kovových materiálů až po extrémně přesné měření ve vědeckém výzkumu. Nejdůležitější z těchto vlastností jsou:

- Vlnová délka a frekvence
- Výkon laserů
- Divergence
- Koherence (jednotnost)
- Účinnost

### 1.4.1 Vlnová délka a frekvence

Většina laserů má monochromatický paprsek, což znamená že je jednobarevný. Tato vlnová délka se odvíjí od materiálu aktivního prostředí, ze kterého je laser vyrobený. Jak bylo naznačeno v předchozích kapitolách, vlnová délka se určuje podle energie fotonu. Ten svou energii získává podle počtu energetických hladin, o které je excitován.[6], [9] Zde rozlišujeme dva parametry – vlnovou délku a frekvenci.

- Vlnová délka určuje délku jedné periody vlny a je přímo úměrná energii fotonů paprsku. Nižší energie znamená delší vlnovou délku. Vlnová délka ovlivňuje chování paprsku při průchodu různými materiály. [2]

- Frekvence paprsku určuje, jak rychle vlna osciluje. Vyšší frekvence znamená, že vlna se pohybuje rychleji a má kratší periody. Frekvence ovlivňuje energetickou hladinu fotonů v paprsku.[2]

V praxi se volba frekvence a vlnové délky laserového paprsku řídí požadovaným využitím. Například v lékařství se často používají lasery s vlnovou délkou v blízkém infračerveném spektru, protože tyto vlny pronikají tkáněmi a nezpůsobují přílišné poškození okolních tkání. Naopak, v průmyslových aplikacích mohou být preferovány kratší vlnové délky a vyšší frekvence, které umožňují preciznější řízení a řezání materiálů.[2]

### **Platí tři pravidla:**

Když se frekvence zvyšuje, vlnová délka se zkracuje.

Když se frekvence zvyšuje, tím se energie fotonu zvyšuje.

Když se vlnová délka zkracuje, tím se energie fotonu zvyšuje. [2]

### **1.4.2 Výkon laserů**

Celkový výkon laseru je důležitá laserová charakteristika, jehož určení může být někdy složité, jelikož lze měřit různými způsoby. Tato část bude popisovat různé pohledy na výkon laserových paprsků.[2]

**Výkon** – vyjadřuje rychlost dodání energie laserovým paprskem, která se udává ve wattech. Většina laserů má z výroby daný optický výkon výstupního paprsku, podle kterého lasery řadíme. I když je to dobrý parametr, jak tabulkově uvádět výkonost laseru a odlišit tak lasery se stejným aktivním prostředím od sebe, určuje pouze množství dodané energie za jednotku času.

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

Takže když například máme 100W laser, tak ten nám dodává 100 joulů za jednu sekundu. To ovšem ve výsledku nezaručuje, že všechny druhy laserů o výkonu 100 W budou řezat naprosto identicky. Toto bude ještě detailněji probráno v pozdějších kapitolách.[2]

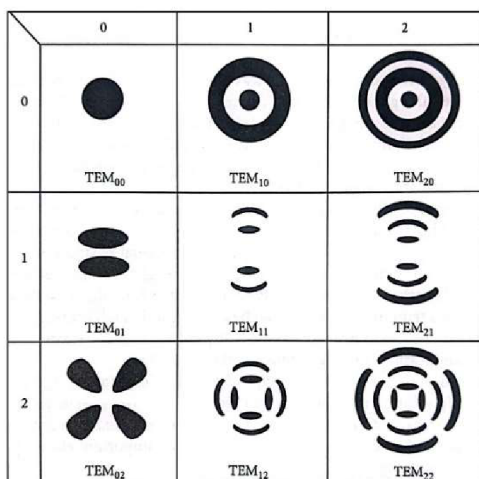
**Energie** – Zde nejprve začneme rozdělením na kontinuální a pulzní lasery.

U kontinuálních laserů je energie v joulech stejná po celou dobu životnosti paprsku, kdežto u pulzních laserů se výkon určuje jako celkové množství energie dodané laserovými pulzy. Čím kratší dobu trvá laseru dodání dané energie, tím vyšší je špičkový výkon. Takže když máme kontinuální laser, který dodává nepřetržitě 100 W, bude se chovat naprosto odlišně oproti laseru pulznímu, jelikož těchto 100W energie bude naakumulováno v příslušných pulzech, které budou mít ve svém špičkovém výkonu řádově více energie.[2]

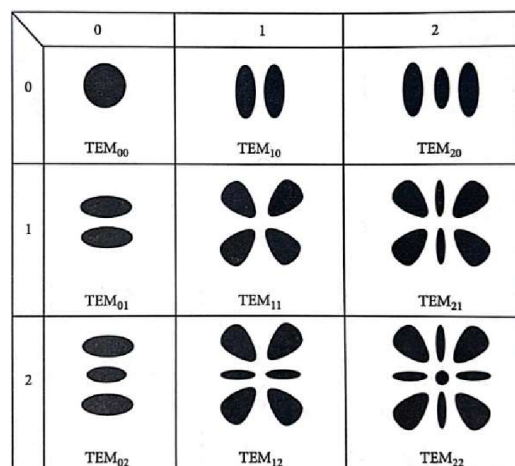
**Intenzita** – udává výkon laseru působící na jednotku plochy. Čím je plocha, na kterou dopadá paprsek menší, tím vyšší je intenzita, a tím více to ovlivňuje jeho vlastnosti. Takže když například vezmeme výkon laseru a nebudeme jej pomocí optického prvku usměrňovat na co nejmenší plochu, bude deformace bez optického prvku daleko menší než s ním. Můžeme si představit sluneční světlo a lupu. Když světlo usměrníme do malého bodu pomocí čočky, kdy bude mít vysokou intenzitu, je schopné napáchat mnohem větší deformaci než tentýž paprsek o stejném světelném výkonu na větší ploše.[2]

Zde však intenzita paprsku nevzniká pouze v případě, že daný paprsek usměrňujeme. Intenzita laserového paprsku je dána i takzvanými módy paprsku TEM (Transverse Electromagnetic mode, obr. 5 a 6). Ty se vyznačují tím, že mají elektrické a magnetické pole kolmé na směr šíření paprsku. Vznikají v důsledku rezonance elektromagnetických vln uvnitř laseru, což vede k vysoké intenzitě paprsku v určitém prostorovém tvaru neboli určují, jaký tvar má průřez paprsku. Toto magnetické pole závisí na řadě faktorů, jako je geometrie optického oscilátoru, materiál aktivního prostředí a jiné. Tyto módy určují jeho aplikovatelnost dle technologií. [2], [5], [8]

Obr 46 TEM módy paprsků [8]



Obr 37 TEM módy paprsků [8]

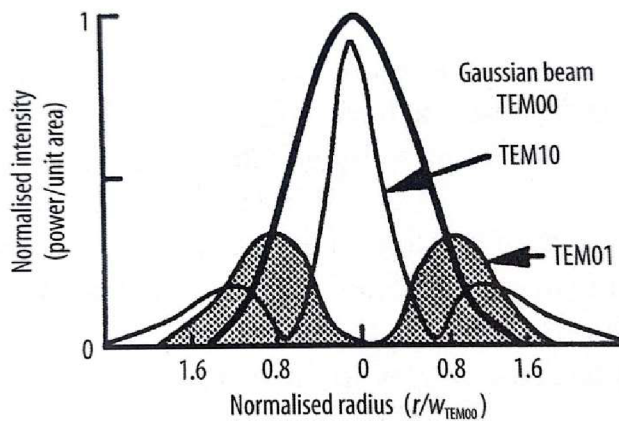


### 1.4.3 Vhodný laserový mód pro řezání

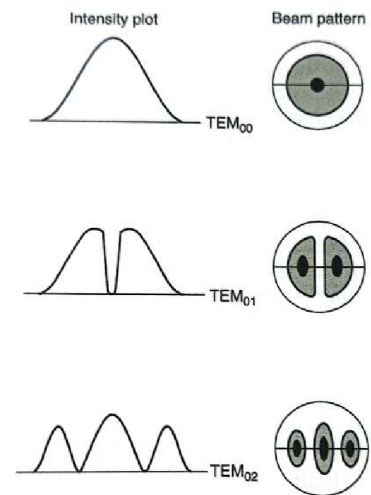
Lasery vhodné pro řezání kopírují tvar Gaussovi křivky. Tento graf krásně zobrazuje intenzitu paprsku v závislosti na jeho rozbíhavosti (divergenci), jak lze vidět na obrázku 8. Lze vidět, že čím je paprsek divergován (rozšíření jeho průměru v závislosti na dráze od zdroje), tím jeho intenzita ve středu paprsku slábne.

Na řezání je tedy potřeba mód paprsku TEM<sub>00</sub>, který nám naznačuje, jak je jeho světlo skoro lineární a jeho divergence je tedy co nejmenší. To je důležité pro to, abychom mohli paprsek pomocí optického prvku soustředit do co nejmenšího bodu, a tím získat velikou intenzitu na plochu o průměru přibližně kolem 0.2 mm. [5], [8]

Obr 64 Porovnání módů na Gaussově křivce [8]



Obr 55 Znárodnění tvaru intenzity paprsku na Gaussově křivce [2]



**Divergence** – vyjadřuje šíření světelného paprsku a popisuje, jak se paprsek rozšiřuje nebo zužuje s rostoucí vzdáleností od zdroje, viz obr. 9. Divergence paprsku se udává úhlovým rozptylem paprsku v radiánech, tedy změnou jeho průměru na určité vzdálenosti od zdroje. Pokud se paprsek rozšiřuje, má kladnou divergenci, zatímco pokud se zužuje, má zápornou divergenci. To je potřeba si uvědomit hlavně v případě, kdy vedeme paprsek na velkou vzdálenost. [2], [5]

Na obr. 7 máme Gaussovu křivku normálního rozdělení, která dokonale vystihuje intenzitu paprsku laseru v závislosti jeho módu. Když má paprsek malou divergenci, nebo když je paprsek blíže u zdroje, má relativně malý průměr a díky tomu je intenzita ve středu paprsku veliká, kdežto když se budeme vzdalovat od zdroje a díky divergenci se průměr laserového paprsku bude rozšiřovat, dojde k tomu, že intenzita ve středu paprsku bude klesat, a tím deformace materiálu budou také klesat. To může mít vliv na to, jaké optické prvky musíme

použit. S rostoucím průměrem je paprsek méně soustředěný, a tím obtížnější je zaostřit ho na malou oblast. [8]

Běžná hodnota divergence CO<sub>2</sub> laseru se pohybuje okolo 2-3 miliradiánu. Pro představení, paprsek o průměru 35 mm a módu TEM<sub>20</sub> pocházející z CO<sub>2</sub> laseru se může zvětšit na 100 mm v průměru při délce paprsku 40 m.[5]

Výpočet divergence:

$$\theta = \frac{2}{\pi} \frac{\lambda}{d_B} \quad (\text{rad})[5]$$

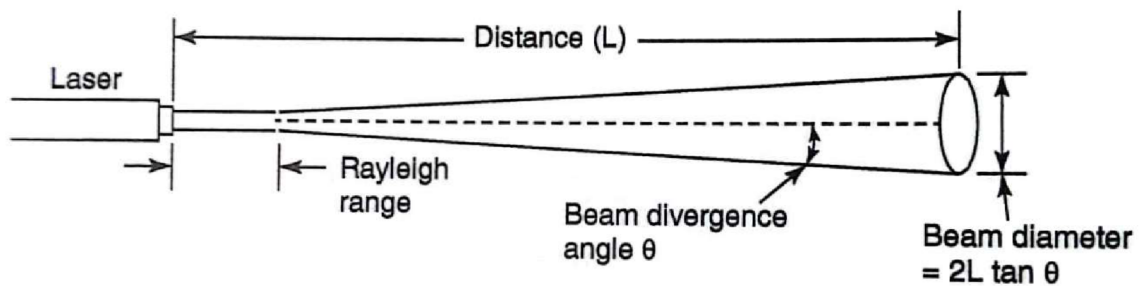
Kde:

$\lambda$  = vlnová délka (m)

$\theta$  = úhel divergence

$d_B$  = výstupní průměr paprsku (m)

Obr 73 Znáornění rozbíhavosti (divergence) paprsku [2]



Výpočet výsledného průměru:

$$D_B = 2L \tan\theta \quad (\text{m})[8]$$

Kde:

$L$  = délka paprsku (m)

$\theta$  = úhel divergence (rad)

$D_B$  = vnější průměr paprsku (m)

**Koherence** – vlastnost laserového světla, díky které se naprosto odlišuje od ostatních světelných zdrojů. Koherenci získává laser stimulovanou emisí. Například slunce, plameny, žárovky a jiné zdroje světla, které jsou tvořeny spontánní emisí jsou nekoherentní. Ona stimulovaná emise činí světlo koherentním, jelikož vstupní (budící) fotony mají stejnou vlnovou délku a fázi jako výstupní fotony. To zjednodušeně znamená, že koherentní laserový paprsek obsahuje vlny, které se pohybují ve krokové synchronizaci, takže se výsledný paprsek chová jako jediná vlna. Stupeň koherence závisí na rozsahu vyzařovaných vlnových délek, které se mezi lasery odlišují. Laser, který vyzařuje pouze jednu vlnovou délku je monochromatický (jednobarevný) a je obecně více koherentní než lasery, které emitují ve větší škále barev. Monochromatické světlo musí být koherentní, kdežto světlo s větší škálou barev nezůstane koherentní na dlouhou vzdálenost.[2]

**Účinnost** – Lasery přeměňují jiné formy energie na laserové světlo. Tato účinnost tedy může být pro některé laserové aplikace velmi důležitá a mnoho pokroků posledních let pochází ze zlepšení účinnosti. U některých raných plynových laserů se ve výstupním paprsku objevilo pouze 0,001 % elektrické energie, která vstoupila do laseru. To, co dělalo laserové světlo cenným, bylo to, že jeho paprsek byl pevně zaostřený, koherentní a monochromatický.[2]

Mnoho moderních laserů přeměňuje 10 % až 70 % vstupní energie na laserové světlo, a to je životně důležité pro aplikace, které vyžadují velké množství laserového výkonu, jako je řezání a svařování kovů nebo budící jiné lasery. Polovodičové diodové lasery dokážou přeměnit až 70 % elektrické energie, která jimi projde, na světlo. Pevné vláknové lasery dokážou přeměnit více než 70 % světelné energie, která je napájí, na vysoce kvalitní laserový paprsek, díky čemuž jsou zvláště vhodné pro průmyslové obráběcí aplikace.[2]

## Dělení laserů

V této části se pokusíme klasifikovat lasery do různých kategorií, abychom mohli vybrat ty, které jsou nejvhodnější pro řezání materiálů. Popíšeme si jejich funkci pouze okrajově, uvedeme jejich výhody, nevýhody, použití a základní vlastnosti. Podrobný popis jednotlivých druhů laserů příslušící pro každé odvětví popisovat nebudeme, nicméně naznačíme princip jejich funkce. Následně v druhé části práce zvolíme vhodný laser pro naše použití a vysvětlíme, proč je pro nás vhodný. Zahrnutí popisu všech druhů laserů, vysvětlení jejich principu a stanovení jejich použití by bylo příliš rozsáhlé a pro tuto práci nepodstatné.

Tyto lasery tedy mohou být klasifikovány podle:

- Aktivního média
- Výstupního výkonu
- Vlnové délky
- Provozního režimu
- Zdroje excitace

### 1.5 Dělení dle aktivního média

#### 1.5.1 Plynové

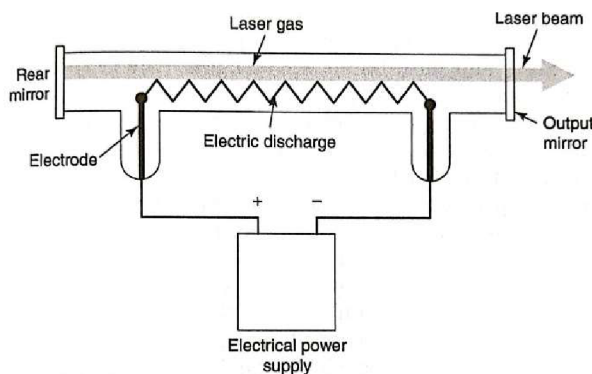
Plynové lasery jsou ty, které mají aktivní prostředí v plynné fázi. Stimulovaná emise je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu – atomů (atomární lasery), iontů (iontové lasery) nebo molekul (molekulární lasery). Většinou se setkáme s plynovými lasery s kontinuálním režimem (paprsek o stejné intenzitě kontinuálně, tedy bez pulzů, vystupuje z laseru), nicméně existují i takové lasery, které pracují v pulzním režimu a dosahují mimořádně velkých výkonů. Hlavní výhodou oproti pevnolátkovým laserům je ta, že je optický svazek méně deformován, jelikož jsou plyny obecně homogennější (má ve všech místech stejné vlastnosti) ovšem za cenu menší hustoty počtu částic, což má pochopitelně za následek malé objemové výstupní výkony. Další nevýhodou je prostorová náročnost těchto laserů. Většina plynových laserů má podobný tvar s obecným plynovým laserem. Plyn je uprostřed trubice se zrcadly na každé straně. [2], [4], [5], [8], [10]

Většina plynových laserů je buzena průchodem elektrického proudu, viz obrázek 10.



Při malých až středních výkonech je výboj obvykle podélný. Při velkých výkonech tyto lasery obvykle pracují při vysokém tlaku a jsou buzeny příčně.[2]

Obr 82 Buzení průchodem elektrického proudu [8]



Aktivní médium laserových plynů lze dělit do tří hlavních skupin podle principu generování světla:

### **Atomární**

Aktivním prostředím jsou elektricky neutrální atomy. (má stejný počet protonů v jádře jako elektronů). Atomové lasery, spolu s iontovými vyzařují světlo v blízkém ultrafialovém nebo infračerveném světle. Jako hlavní druhy atomárních laserů jsou helium-neonový (He-Ne), xenonový (Xe) a jodový (I) laser.[2], [5], [10]

### **Iontový**

Když má atom více, nebo méně elektronů než protonů v jádře, vzniká iont. Tyto lasery jsou tvořeny ionty vzácných prvků nebo ionty par kovů. Pro správnou funkci se musí laserová trubice nejprve zahřát, aby se odpařila část kovu a mohla emitovat světlo. Jako nejznámějším široce využívaným laserem je laser argonový (Ar). Nicméně existuje řada dalších, jako například kryptonový (Kr), helium-kadmiový (He-Cd), argon-kryptonový (Ar-Kr), měděný (Cu). Tyto lasery mají velkou škálu vlnových délek. [2], [5]

### **Molekulární**

Princip absorpce a emise u molekulárních laserů je poměrně složitější, než tomu je u atomárních či iontových laserů. Molekuly jsou složeny z atomů a iontů, které jsou k sobě vázány elektronovou vazbou. Zde lze říct, že elektrony jsou v molekule zodpovědné za chemické vazby atomu. Molekuly mají totiž ještě další dvě hladiny, které jsou zodpovědné za

emisi záření. Tím jsou hladiny vibrační a rotační, a právě tyto jsou zodpovědné za vyzařování kvant energií.

K vyzařování energie slouží obě tyto hladiny, nicméně vibrační je nadřazenější hladina. Když tedy dojde k vyzařování fotonů najednou z obou těchto hladin, vlnová délka se blíží právě vlnové délce z vibrační hladiny, jelikož je energetičtější.

Jako nejznámější molekulární lasery známe oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), oxid uhelnatý (CO), dusík (H<sub>2</sub>), a pak speciální Excimerové lasery. [2], [5], [8]

### 1.5.2 Pevnolátkové

Nejprve je nutné říci, že svět laserů definuje “pevné skupenství” definuje svět laserů jinak, než elektrotechnici nebo fyzici pro které jsou pevnými látkami spíše polovodiče, které v elektronice slouží pro vedení energie, nebo pro provádění elektronických operací. V laserové terminologii se oddělují polovodičové lasery od pevnolátkových, protože jsou napájeny jinak. Pevnolátkové lasery jsou ty, které používají jako aktivní prostředí materiály v pevném stavu a musí být transparentní, aby světlo zdroje mohlo procházet pevnou látkou a přenášet do něj energii. Nicméně tento materiál však musí být schopen tuto energii také absorbovat. Proto se již při výrobě do vhodného zcela transparentního materiálu (většinou v podobě krystalické či amorfni látky, jako je krystal oxidu hlinitého, sklo atd.) přidávají příměsi vhodných iontů. Ty jsou poté pevně zabudovány v krystalické mřížce. Díky tomu tedy vzniká nevýhoda homogenosti oproti plynovým laserům, jelikož tyto ionty, většinou vzácných kovů, nejsou rovnoměrně rozmístěny v nosném krystalickém materiálu, který se nazývá matrice. Výhodou je, že mohou pracovat za různých provozních podmínek a nemají tak velkou prostorovou náročnost, jako tomu bylo u plynových laserů. Tyto lasery převážně fungují v pulzním režimu a jsou buzeny především opticky. Jako nejúspěšnější ze zástupců pevnolátkových laserů se stal iont Nd v matici yttrium aluminium granátu, neboli označení jako Nd:YAG. Je však spousta jiných druhů pevnolátkových laserů jako Nd:sklo, Er:YAG, Nd:YAG, Ho:YAG, Yb:YAG, Nd:YLF, Nd:YAP a jiné. Pojmenování těchto laserů je podle prvku aktivních iontů a matrice, která nese ionty ve své krystalické mřížce. [2], [5], [8], [10]

### 1.5.3 Polovodičové

Nejčastěji používané polovodičové lasery jsou takzvané diodové lasery. Polovodičový laser je takový, který má aktivní prostředí tvořené polovodiči neboli látkami, které jsou svými vlastnostmi mezi vodiči a izolanty. Křemík je nejznámějším polovodičem pro jeho využití v elektronice, nicméně pro laserové účely se nehodí, jelikož velmi špatně vyzařuje světlo. Nejčastěji se používají polovodiče, které obsahují dva a více prvků. Například arsenid galia (GaAs), nitrid galia (GaN) a fosfid india (InP). [2], [5], [8]

*Obr 91 Modul laserové diody [27]*



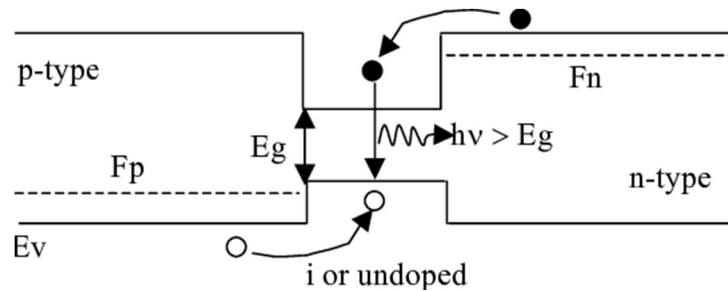
Správně se nazývají “polovodičové diodové lasery“, ale jsou známé jen jako “dioda“ nebo je můžeme nazývat i jako “přechodový laser“, jelikož k vyzáření paprsku dochází na přechodu mezi dvěma typy polovodičů, takzvaný PN přechod.

V polovodičovém laseru se utváří aktivní oblast, ve které dochází ke stimulované emisi elektronů. Nedochozí zde k přechodu mezi energetickými hladinami, ale mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Polovodič typu N daruje elektrony, zatímco polovodič typu P produkuje díry. Pokud je PN přechod napětově polarizován tak, aby kladná strana byla napájena kladným potenciálem a záporná strana záporným potenciálem, elektrony se budou pohybovat ke kladnému pólu a díry k zápornému pólu. Tento proud elektronů a děr přes PN přechod emituje světlo v aktivní vrstvě diodového laseru, jak je. Fotony se poté odrazí od ploch na obou koncích laserového rezonátoru a vytvářejí koherentní světelné záření.[2], [10], [11]

Není potřeba zrcadel na koncích, jelikož mají velký rozdíl indexu lomu se vzduchem. Mohou být jak pulzní, tak i kontinuální a jsou buzeny elektrickým proudem. Mezi výhody patří malé rozměry, jsou buzeny el. proudem, mají vysokou účinnost a mohou mít vysoký výkon, jelikož se mohou tyto přechody na sebe vrstvit v libovolných počtech. Nevýhodou je, že vlnová

délka je závislá na teplotě, tudíž je potřeba chlazení, také mají tyto diody velkou divergenci paprsku a rozbíhavost je nesouměrná, jelikož plocha, která generuje světelný paprsek je obdélníková, a tudíž má paprsek tvar elipsy. Z toho důvodu se při laserových aplikacích diody snaží co nejdříve usměrnit a vést paprsek optickým vláknem. Nejčastěji se však diody používají jako zdroj excitace pro pevnolátkové lasery, především pro takzvané Vláknové lasery.[11]

Obr 99 Diagram aktivního prostředí diody [28]

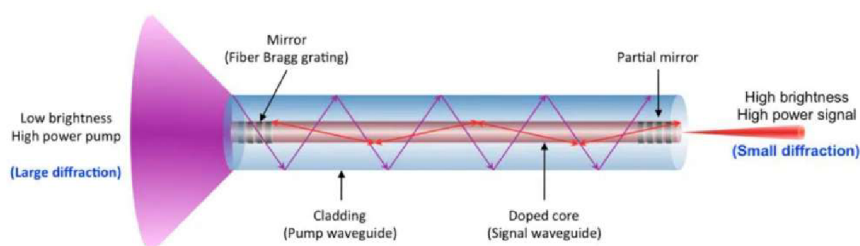


#### 1.5.4 Vláknové lasery

Jsou pevnolátkové lasery, ve kterých je aktivní materiál ve formě optického vlákna. Vláknem může být nejčastěji vyrobeno z křemíkového oxidu ( $\text{SiO}_2$ ), dopovaného oxidem germaničitým ( $\text{GeO}_2$ ), nebo fosforečnanu germaničitým ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Tyto materiály jsou zvoleny proto, že mají vysokou schopnost přenášet světlo a dobře se s nimi pracuje. Vláknem je obvykle obohaceno příměsí, jako jsou například erbium, ytterbium, nebo neodym, díky kterým může docházet k absorpci světla, jako tomu bylo u pevnolátkových laserů. Většina vláken má jádro, vnitřní a vnější plášť. Vnější plášť je většinou izolant, který chrání vlákno před poškozením a únikem záření do okolí. To neznamená, že bez ochranného pláště by laser nefungoval. Fungoval by díky velkému indexu lomu světla se vzduchem, ale kdykoliv by se optické vlákno někde opřelo, stačil by jen otisk prstu, který zanechá mastnou stopu a záření by tudy unikalo pryč. Čerpání probíhá pomocí laserových diod, a to většinou tak, že se svítí do vnitřního pláště a díky odrazu se fotony diodového laseru odrážejí, procházejí přes jádro, kde dodává energii k absorpci a samotný paprsek vláknového laseru vzniká uvnitř jádra. Na obrázku 13 můžeme vidět čerpání touto metodou přes plášť [2], [8], [11]

Obr 13 Čerpání vláknového laseru metodou přes plášť [29]



V jádře tedy vzniká paprsek, který má nyní malou divergenci a na konci vlákna ho opouští. Vlákna se mohou rozdělovat, takže je možné přidávat více diod, které se spojí v jeden celek. Díky tomu, že je paprsek utvářen ve vláknu, mohou být vláknové lasery použity při aplikacích, kde bychom zrcadly a jinými optickými prvky vedly paprsek obtížně, jako například u svařovacích robotů.[5], [11]

### 1.5.5 Kapalinové lasery

Speciální lasery, které používají jako aktivní materiál organická barviva, proto jsou tyto lasery označovány jako barvivoové lasery. Barvivo je obvykle složitá organická molekula, která je rozpouštěna v rozpouštědle. Jako zdroj excitace se používá vysoce intenzivní lampa nebo jiný laser. Princip emise záření je stejný, jako u molekulárního laseru. Výsledná vlnová délka lze ovlivnit použitým barvivem, tudíž jí lze snadno měnit.[2]

## 1.6 Dělení dle výstupního výkonu

Lasery se obvykle dělí podle výkonu na tři základní kategorie:

- **Nízko výkonové lasery** – mají výkon do několika desítek mW. Tyto lasery se nejčastěji používají v medicíně, kosmetice, optice a jako ukazovátka.
- **Střední výkonové lasery** – mají výkon od několika desítek W (wattů) do několika set W. Tyto lasery se využívají v průmyslu, vědě, medicíně.
- **Vysoko výkonové lasery** – mají výkon v řádu kilowattů (kW) až megawattů (MW). Tyto lasery se využívají například v průmyslu k řezání, svařování a kalení.

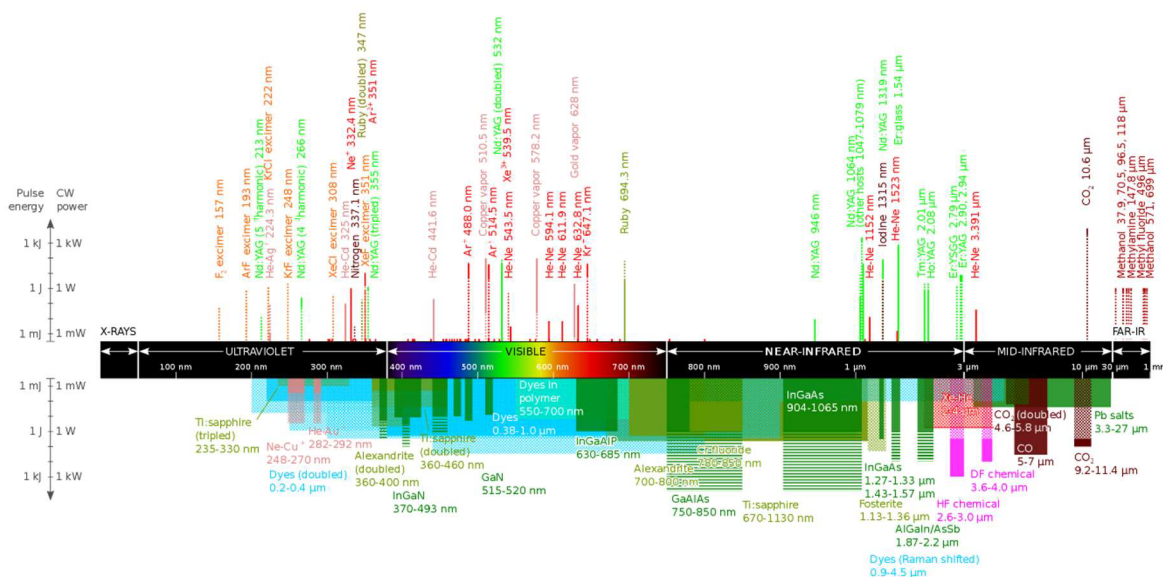
## 1.7 Dělení dle vlnové délky

Na obrázku 14 můžeme vidět jednotlivé materiály aktivního prostředí a jejich vlnovou délku.

Dělíme je na:

- **Ultrafialové (UV):** Tyto lasery vyzařují světlo v rozsahu 100-400 nanometrů. Používají se při zpracování polovodičů, litografie nebo třeba při lékařském ošetření.
- **Viditelné spektrum:** Jejichž vlnová délka je v rozsahu 400-700 nanometrů. Jako příklad uvedeme lasery, které mají barvu, jakou lidské oko dokáže rozlišovat, tedy modré, červené a zelené lasery.
- **Infračervené (IR) lasery:** vlnová délka těchto laserů se pohybuje od 700-1000 nanometrů.
- **Dálkově infračervené (FIR) lasery:** které mají vlnovou délku 1000 mikrometrů až jeden milimetr.

Obr 14 Vlnové délky v závislosti na použitém aktivním prostředí [30]

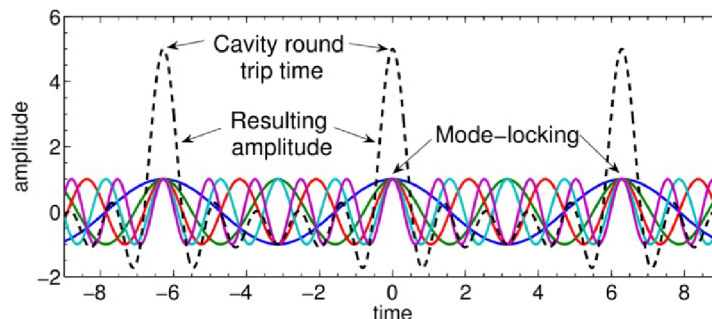


## 1.8 Dělení dle provozního režimu

Rozdělujeme tři hlavní provozní režimy laserů.

- **Volně běžící (kontinuální) režim** – Generace neuspořádaných peaků se spojují v kontinuální paprsek vystupující z laseru.[11]
- **Q-spínání** – Je princip, při kterém je do laseru vložen spínač, který kontinuální paprsek rozdělí na pulzy s vyšší intenzitou. Dojde k tomu tak, že u kontinuálního paprsku jen určité množství atomů vyzařuje fotony, zatímco se ostatní „nabíjí“. Když do obvodu vložíme spínač, tak ten zajistí, aby když dojde k vyzařování pulzu, tak byla většina atomů v excitovaném stavu. Můžeme říct, že se aktivní materiál nabíjí, než bude moci vyzařit fotony. Když spínač sepne a fotony budou moci být vypuštěny v podobě pulzu, uvolní se tak většina fotonů během okamžiku a poté zase dojde k uzavření, aby se materiál excitoval.  
Výhoda je v tom, že při stejných parametrech jako u aktivního prostředí kontinuálního laseru se dokáže uvolnit více energie akorát v pulzech. Dříve se jako Q-spínač používala zrcadla, která byla upevněna na rotujícím kole a počty otáček určovaly pulzy, nicméně dnes se využívá elektro optických spínačů.[2], [5], [8], [11]
- **Mode locking** – Svazuje dohromady podélné módy uvnitř laserového rezonátoru, aby se zesiloval pouze jeden laserový pulz viz obr. 15. Ten se bude postupně na úkor ostatních po několika průchodech zesilovat, až vznikne pouze jeden pulz a fáze všech ostatních jsou synchronizovány.[11]

Obr 15 Princim Mode lockingu [8]



## 1.9 Dělení dle zdroje excitace

Existuje několik způsobů, jak vyvolat excitaci v aktivním médiu laseru, a to závisí na konkrétním typu laseru. Některé zdroje excitace zahrnují:

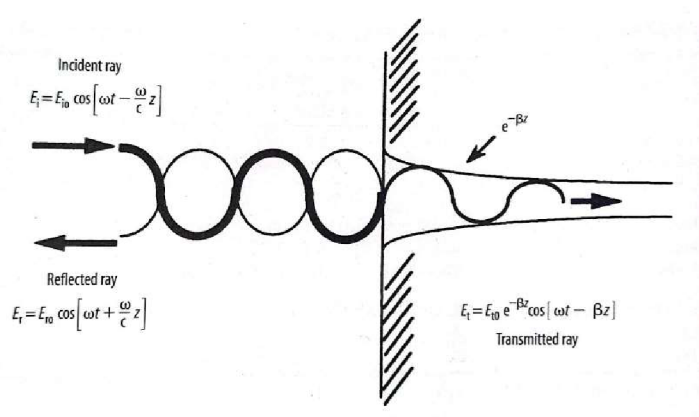
- **Optická excitace** – aktivní médium laseru je stimulováno světlem, často laserovým paprskem, což vyvolá emisi dalšího světla s téměř stejnou vlnovou délkou
- **Elektrická excitace** – elektrický proud je aplikován na aktivní médium, aby se dosáhlo excitace atomů, což vyvolá emisi světla.
- **Chemická excitace** – v některých typech laserů se aktivní médium excituje chemickou reakcí, což může zahrnovat spalování paliva nebo reakce mezi dvěma chemikáliemi
- **Jaderná excitace** – jaderná reakce může být použita k excitaci aktivního média, jako je u laseru na záření X.
- **Elektronová bombardování** – elektrony jsou urychlovány k vysokým energiím a poté nasměrovány na aktivní médium, což vyvolá emisi světla.

Tyto zdroje excitace mohou být použity v kombinaci spolu s různými typy aktivních prostředí pro dosažení požadovaného výstupního vlnového spektra a výkonu.[2], [5], [6], [8]

## Interakce paprsku s materiálem

Po představování laserového paprsku se konečně dostáváme k části, kde budeme popisovat interakci laserového paprsku s obráběným materiálem a vysvětlíme si základní princip řezání laserovým paprskem a ukážeme si, jak různé druhy materiálů lze řezat.

Obr 16 Přechod paprsku ze vzduchu do materiálu [8]



Když elektromagnetické záření laserového paprsku dopadá na povrch materiálu, bude se materiálem šířit jako na obrázku 16. Část záření se odrazí, část pohltí a část propustí do

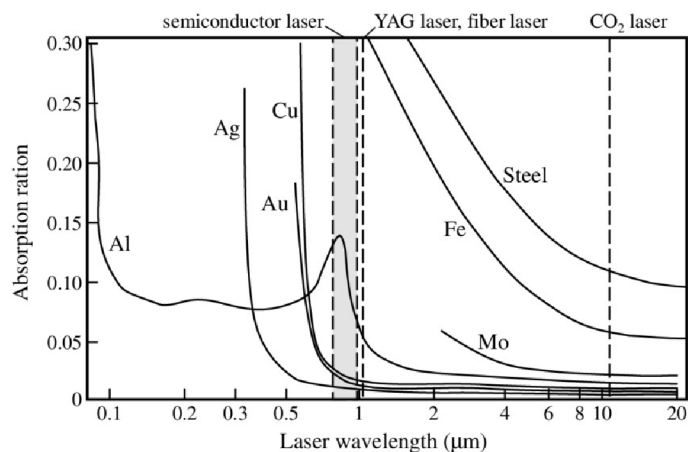


materiálu. Když toto záření projde do materiálu, začne působit na molekuly, které se rozvibrují a dojde k ohřívání látky. Toto ohřátí je pouze v bodě, kam je laserový paprsek zaostřen. Poté dochází k natavení a odpaření, či rovnou k sublimaci materiálů (rovnou se odpařují bez toho, aby došlo k natavení)[8]

Avšak každý materiál má jinou reflektivitu (odrazivost povrchu). Díky tomu je každý materiál jinak schopný absorbovat paprsek. Nekovové materiály mají obecně menší reflektivitu, tudíž snadněji absorbují záření. Naopak něk Se zvyšující se reflektivitou se stává materiál hůře obrobitelný, díky čemuž můžeme vést laserový paprsek zrcadly a nedojde k jejich spálení ani přehřívání. Pokud ale dojde ke zdrsnění povrchu či ke speciální úpravě například antireflexním sprejem, obrobitelnost se značně zvyšuje.[5], [8]

Když má paprsek menší vlnovou délku, jeho elektrony mají větší energii a při dopadu na materiál jsou absorbovány větším počtem vázaných elektronů. To způsobuje rychlejší zahřívání materiálu a tím klesá odrazivost a zvyšuje se pohltivost, viz obr 17.[8]

Obr 17 Pohltivost kovových materiálů v závislosti na vlnové délce [31]



To je hlavním důvodem, proč například diodové lasery s vlnovou délkou v oblasti viditelného spektra lépe obrábí kovy, na rozdíl od CO2 plynových laserů, které mají vlnovou délku značně vyšší.

## 1.10 Metody řezání

V závislosti na daném materiálu a požadovaném výsledku určeného technologií rozlišujeme 6 metod řezání.[5], [8]

- Řezání odpařením
- Řezání natavením a odfukem
- Praskání tepelným napětím
- Gravírování
- Rýhování
- Studené řezání

### 1.10.1 Řezání odpařováním

Při této metodě požadujeme, aby byl materiál odpařen. Zaostřený paprsek nejprve zahřeje povrchovou vrstvu na bod varu a vznikne takzvaná klíčová díra. Díky tomu se absorpce záření znásobí díky mnohonásobné reflexi uvnitř a díra se tak rychle prohloubí. Jak se prohlubuje, vzniká pára, která uniká a vyfukuje výron z díry či řezu a stabilizuje roztavené stěny. Tato metoda je především pro pulzní lasery nebo pro materiály, které se netaví, jako jsou dřevo, uhlík a některé plasty.

Rychlost pronikání paprsku do materiálu lze zhruba odhadnout z výpočtu soustředěné tepelné kapacity za předpokladu, že je tepelný tok jednorozměrný a celý je použit v procesu odpařování, tedy za předpokladu, že přestup tepla do okolí by byl nulový.[5], [8]

Přibližná rychlost objemu odebraného za jednotku času se dá vypočítat jako:

$$V = \frac{F_o}{\{\rho[L+C_p(T_V-T_0)]\}} \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})[8]$$

Kde:

$F_o$  = výkonová hustota ( $\text{W m}^2$ )

$\rho$  = hustota pevné látky ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$L$  = latentní teplo tání a vypařování ( $\text{J kg}^{-1}$ )

$C_p$  = tepelná kapacita pevné látky ( $\text{J kg}^{-1}$ )

$T_V$  = teplota vypařování ( $^{\circ}\text{C}$ )

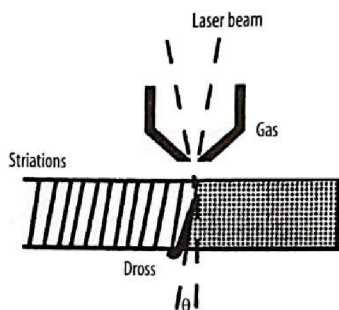
$T_0$  = teplota materiálu na začátku ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 1.10.2 Řezání natavením a odfukem

Nesmíme si plést tuto metodu s klasickým použitím proudu vzduchu o malém tlaku, který slouží k odfuku výparů ve směru paprsku, aby nedocházelo ke ztrátě výkonu.

Princip funguje tak, že jakmile je vytvořena klíčová dírka po natavení povrchové části materiálu, nebo je zahájen řez od okraje, je možné dostatečně silným proudem plynu roztavený materiál vyfouknout ven a vyhnout se tak nutnosti spotřeby dalšího množství energie na odpaření. Klesá zde nárok na výkon až na jednu desetinu oproti řezání odpařováním. Tento způsob se využívá hlavně při řezání kovů, nicméně k tomu dochází i třeba při řezání akrylu. Na obr 18 můžeme vidět, jak probíhá řezání s odfukem. [5], [8]

Obr 18 Řezání s odfukem [8]



Pokud je plyn také schopen exotermicky reagovat s obrobkem, je možnost dodat do procesu další zdroj tepla. Většinou se jako reaktivní plyn používá kyslík, nebo různé směsi obsahující kyslík. Exotermická reakce začíná většinou nahoře, když se dosáhne pomocí laserového paprsku teploty vznícení. Spolu s kyslíkem se používá ještě dusík, který zde vyfukuje materiál z řezu a výsledné řezné hrany jsou díky tomu čisté. Množství dodávané energie hořící reakcí se mění v závislosti na materiálu, nicméně například u měkké nebo nerezové oceli je teplota dodaná do řezu plynem 60 % a u titanu je to například až 90 %. Nicméně řezná rychlost se díky tomu zrychlí minimálně dvojnásobně. [8]

Jestliže řezeme s přídavným kyslíkem, lze očekávat některé chemické změny v obrobku. Například pro titan to může znamenat nasycení řezné hrany kyslíkem, která bude pak tvrdší a náchylnější k praskání. [8]

Na druhou stranu se využívá u řezání kovových materiálů pomocí CO<sub>2</sub> laseru, který má účinnost při řezání kovů zhruba kolem 10 %. Když máme CO<sub>2</sub> laser s přídavným kyslíkem o výkonu 1.5 kW, jsme schopni řezat 10 mm tlustou ocel rychlostí 1 m min<sup>-1</sup>. [5]

Je nutné zmínit, že odfuk vzduchem je i u první metody, nicméně rozdíl je především v tom, že při řezání odpařováním slouží přiváděný vzduch jako ochrana fokusace čočky před odpařovaným materiálem a zabraňuje výparům v rozptylu paprsku, aby se jeho výkon nezmenšoval. Zato u této metody s odfukem k vyfukování materiálu či zmíněném přívodu reaktivního plynu. Na to jsou k laserové hlavě připevňovány speciální trysky, které se liší výstupním průměrem v závislosti na řezané tloušťce materiálu a tyto trysky směřují přiváděný plyn přímo do řezu.[5]

### **1.10.3 Praskání tepelným napětím**

Křehký materiál, který je náchylný k tepelnému lomu, lze rychle a úhledně odříznout vedením trhliny pomocí malého zaostřeného bodu laseru.

Laser zahřeje malý objem povrchu, což způsobí jeho roztavení, a tím způsobí tahové napětí všude kolem něj. Pokud je v tomto prostoru trhlina, bude působit jako urychlovač napětí a praskání bude pokračovat směrem zahřívání místa. Rychlost, kterou lze vést trhlínu, je rychlá řádově  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Uprostřed materiálu lze řezat přesně, nicméně do doby, než se paprsek dostane k okraji, kdy se pole napětí stanou složitějšími a obtížněji předvídatelnými.[8]

Tato metoda je vhodná pro řezání skla. Rychlost, kvalita hran a přesnost jsou velmi dobré. Problém nastává, když řez je rovný, protože v tu chvíli je rychlost šíření praskliny rychlejší než rychlost řezání. Další nevýhoda je, že při řezání složitějších tvarů musí být profil uzavřený. Pro řezání skla touto metodou musíme volit laser, který má vlnovou délku, pro kterou sklo není transparentní, jako je například CO<sub>2</sub> a Nd:YAG laser.[5], [8]

### **1.10.4 Gravírování**

Gravírování zahrnuje lokalizované roztavení nebo odpaření povrchu do hloubky přibližně 0,1 mm. Kontrast je způsoben optickými rozdíly ztuhlých nebo odpařených oblastí materiálu. Gravírování se většinou používá pro značení součástí, nicméně využití nalezne i u grafického zpodobnění obrazu na plochu materiálu. U gravírování je požadováno, aby daná značka byla odolná proti otěru. Jednotlivé obrazy jsou převedeny na body v řádku a kontrast se určuje počtem bodů na jednotku délky, jak je možné vidět na detailním snímku pořízeného autorem práce.[5]

Obr 19 Detailní pohled na gravírování



### 1.10.5 Laserové rýhování

Laserové rýhování je proces, při kterém se laserový paprsek používá k vytváření tenkých rýh v materiálu. Tyto rýhy mohou sloužit k oddělení částí materiálu, nebo ke vytváření přesných liniových struktur, jako jsou například elektronické obvody.

Odlišuje se oproti gravírování, které zanechává převážně plošné a hloubkové rytiny v materiálu, laserové rýhování vytváří tenké a přesné linie, které mají často jen malou hloubku. Proces se používá zejména v oblasti výroby elektroniky, kde se s jeho pomocí vytvářejí struktury na čípech a jiných elektronických součástkách.[5], [8]

### 1.10.6 Studené řezání

Studené řezání laserem (anglicky Cold laser cutting) je proces, při kterém se používá laserový paprsek k řezání materiálu bez tepelného namáhání. Tento proces se používá zejména u materiálů, které jsou citlivé na vysoké teploty a mohly by se při běžném řezání laserem deformovat, nebo dokonce vznítit.[8]

Při studeném řezání laserem se využívají speciální laserové systémy, které vytvářejí velmi tenký paprsek s vysokou energií. Tento paprsek dokáže prorazit materiál bez vytváření tepelného vlivu na okolí. To znamená, že materiál v řezu se rychle zahřeje a sublimuje bez toho, aniž by stihl předat teplo materiálu mimo řez. Tím nedochází k jeho deformaci, což je obvyklým problémem při řezání materiálů s laserem.[8]

Studené řezání laserem se využívá zejména při výrobě tenkých kovových plechů, ale také u jiných materiálů, jako jsou plastové fólie nebo papír.[5]

## Konstrukce

V této kapitole si ukážeme konstrukční řešení, která jsou dostupná na trhu. Následně se podíváme podrobněji na některé části konstrukce, vysvětlíme si, jak fungují a zkusíme najít nejlepší řešení, které by bylo vhodné pro sestavení laserového řezáku pro domácí použití.

### 1.11 Druhy konstrukcí

Zde se zaměříme na současné, pro běžného uživatele dostupné stroje pro použití v domácích podmínkách.

#### 1.11.1 Nejmenší laserové gravírovací stroje

Tyto malé gravírovací stroje jsou tou nejnižší třídou v oblasti gravírování a řezání. Jedná se o gravírovací stroje s diodovým laserem o výkonu do 5 W a jejich rozměry gravírované plochy jsou maximálně 200 x 200 mm. Jedná se buď o gravírovací stroje s pevnou konstrukcí a dnem, nebo naopak bez. Na obrázku 20 můžeme vidět gravírovací stroj beze dna. Výhoda je, že jsou levné a přenosné, takže když je potřeba například vygravírovat sériové číslo, nebo nějakou značku, tak díky malým rozměrům lze stroj umístit kamkoliv a vygravírovat požadovaný tvar. Využívají se například i v potravinářském průmyslu. Název “gravírovací stroj“ je zde na místě, jelikož na řezání materiálů tento stroj vhodný není. Jedná se o otevřenou konstrukci, která je doplněna o bezpečnostní skla s ochranou proti vlnové délce, nicméně z hlediska bezpečnosti to stále není dostatečné a výpary nejsou odváděny ani filtrovány. Cena se pohybuje kolem 5 000 Kč.[12]

Obr 20 Nejmenší gravírovací stroj beze dna [12]



### 1.11.2 Malé laserové stroje

Další kategorií jsou stroje, které již mají větší gravírovací plochu a výkonově se pohybují v jednotkách až desítkách wattů. Laser je zde opět diodový modul o maximálním výkonu 35 W optického výkonu, který je složen z více diod a usměrněn do jednoho svazku pomocí optických prvků. Chlazení laseru většinou probíhá aktivním vzduchovým chlazením modulu s přídavným větrákem, nicméně jsou na trhu i vodou chlazené modely, jelikož jak bylo řečeno, vlnová délka diodového laseru závisí i na teplotě.

Jedná se vždy o otevřenou konstrukci beze dna, takže je zde opět výhodou přenosnost a lze ho umístit na libovolný předmět. Tento typ laserů většinou nepoužívá vzduchovou asistenci odfuku zplodin, takže výkon laseru zhoršují výpary, které vznikají při řezání. Například při řezání dřeva může dojít ke vznícení a vypálený tvar bude mít kolem řezu zahnědlé okolí.

Laserová zaostřovací čočka laseru díky absenci laserové asistence bude mít zhoršenou životnost, jelikož se na ní mohou výpary usadit. Jelikož se jedná o otevřenou konstrukci, je nutné zajistit cirkulaci vzduchu v místě provozu, jelikož výpary mohou být zdraví škodlivé. U takto slabých laserů se používá vícenásobná kontura obrysu, aby se docílilo hlubšího řezu, nicméně toto je velice neefektivní a časově náročná operace. Oproti nejmenším laserům zmíněných v předchozí kapitole, jsou však schopné řezat dřevo, kůži, papír, karton nebo akryl. Hlavní výhodou tohoto laseru je ta, že díky své vlnové délce, pohybující se v oblasti viditelného spektra, je možné gravírovat některé kovy bez nanášení antireflexního spreje.

Bezpečnost je stejná jako u předešlé kategorie a to tak, že okolí paprsku je ohraničeno sklem s ochranou proti vlnové délce laseru, nicméně proti odrazům od materiálu nijak nechrání. Cena těchto strojů se pohybuje od cca 8 000 - 30 000 Kč.[1], [13], [14]

*Obr 21 Konstrukce malého laserového stroje [1]*



### 1.11.3 Malé uzavřené laserové stroje

Pokud postoupíme o třídu výše, nalezneme zde již celkem praktické laserové stroje, které mají jako hlavní výhodu to, že jsou uzavřené. Využívají se především pro modelářské aplikace, kdy dokážou rychle a přesně řezat v podmínkách domácího prostředí, a to převážně právě kvůli jejich uzavřenosti a odsávání zplodin. Odsávání je zde však zároveň i nevýhodou, jelikož musíme vyvést ventilátorem do venkovních prostor. Disponují DC CO<sub>2</sub> plynovým laserem o výkonech 50 W. Jedná se o skleněnou trubici chlazenou kapalinou, kde chladič je umístěn v boční straně konstrukce. Pracovní plocha je 500 x 300 mm a finální rozměry stroje cca 1000 x 600 mm. Stroj disponuje vzduchovým odfukem pro ochranění čočky a docílení kvalitního řezu. Laser je schopný řezat všechny nekovové materiály kromě skla a keramiky. Nicméně na rozdíl od diodových laserů mohou gravírovat sklo díky vlnové délce. Bezpečnost je zde zajištěna uzavřenou konstrukcí a druhem použitého laseru, jehož vlnová délka neprojde sklem, nemusí mít ochranné sklo žádnou speciální úpravu. Cena se pohybuje od 61 000 Kč -160 000 Kč.[15], [16]

*Obr 22 Konstrukce malého uzavřeného stroje [16]*



### 1.11.4 Středně výkonné laserové stroje

Zde nalezneme stroje s výkonem od 60 do 150 W. Jsou dostatečně výkonné na řezání všech druhů nekovových materiálů, kamene a keramiky, může gravírovat i řezat sklo, ale pouze metodou 5.1.3. popsanou v kapitole o metodách řezání. Ačkoliv je však výkon laseru dostatečný, zdroj paprsku je pokaždé CO<sub>2</sub> plynový laser, který díky své vlnové délce má velkou reflektivitu s kovy a tak není schopen řezat a ani gravírovat kovové materiály bez toho, aniž by musely být ošetřeny antireflexním nástřikem. Pro řezání kovů by musel výkon CO<sub>2</sub> laseru dosahovat výkonu minimálně 1 kW, aby mohla být použita metoda řezání s přídavným kyslíkem, tohoto ovšem v této cenové kategorii docílit nelze. Nicméně je zde samozřejmě odfuk vzduchem pro zajištění delší životnosti čočky a také k zajištění lepšího řezu. Pracovní plocha



těchto strojů je 900 x 600 mm, celkové rozměry stroje jsou a mají průchozí boky, aby uživatel mohl umístit delší materiál, než je plocha voštinového stolu, nicméně v tomto případě mohou výpary unikat do okolí dílny. Odsávání vzduchu je řešeno identicky jako v nižší třídě a to tak, že trubka musí být vyvedena do venkovních prostor.

Cena se pohybuje od 100 000 Kč do 350 000 Kč, což je již opravdu hodně, a právě na konstrukci tohoto typu se zaměříme v následující kapitole, jelikož jsou tyto stroje díky svým rozměrům vhodné pro nejvíce aplikací, co se týče výkonu, rozměrů a funkčnosti.[17]

*Obr 23 Konstrukce středně velkého gravírovacího stroje [17]*



## 1.12 Konstrukční řešení

V této kapitole se podíváme na řešení vhodné pro použití v CNC hobby laserovém stroji. Nejprve začneme laserem, který by byl nejvhodnější. Poté bude následovat chlazení, vedení paprsku a napájení stroje. Následně naznačíme, jaký nejvhodnější systém pojezdů a naznačíme, jaká by byla nejvhodnější kombinace pohonů CNC. Jako poslední se podíváme na materiály, které by bylo bezpečné použít na opláštění stroje. Tato kapitola bude čistě teoretická a části budou voleny tak, jak by autor práce postupoval při konstrukci a bude tím detailněji přiblížená konstrukce takovýchto strojů.

### 1.12.1 Výběr laseru

Nejčastěji používanými lasery pro domácí použití jsou stále CO<sub>2</sub> lasery, a to hlavně díky jejich ceně a variabilitě řezaných materiálů. Rozlišujeme je podle zdroje excitace na radiofrekvenční (RF) a buzený průchodem elektrické energie (DC). [18] Bude se tedy pozornost upínat právě na tyto dva. Jiné typy laserů se na použití v domácích podmínkách příliš nehodí. Zmíněný diodový laser nemá dostatečný výkon na řezání některých typů materiálů a jejich tloušťek. Používají se tedy spíše na gravírování, jak již bylo zmíněno u malých gravírovacích strojích, nebo je lze dodatečně přidělat na CNC frézku také za účelem gravírování. Dostupná cenová kategorie pevnolátkových laserů začíná vláknovým laserem s cenou od 100 000 Kč, což je způsobeno především cenou aktivního prostředí, které musí obsahovat atomy vzácných prvků, jak již bylo zmíněno v kapitole o pevnolátkových laserech. Tudíž se nehodí na použití v domácích podmínkách především právě kvůli ceně.

### 1.12.2 Porovnání CO2 laserů

#### **DC (Direct Current) CO2 laser:**

Jedná se o skleněné provedení CO2 plynového laseru. Tělo se skládá z dlouhého foukaného skla, které je naplněno aktivním plynem a na obou koncích uzavřeno zrcadly, aby plyn nemohl unikát. Plyn zde neproudí jako u vysokovýkonných laserů, ale je zde napuštěn a uzavřen, a tudíž jeho aktivní prostředí nemůže být vyměněno. Využívá se zde zdroje elektrické excitace, kdy proud prochází aktivním prostředím a excituje molekuly. Má paprsek v kontinuálním režimu. Jeho vlnová délka se pohybuje v infračervené oblasti spektra a to konkrétně 10,6  $\mu\text{m}$ . [18], [19]

Výhody:

- Vysoká kvalita řezání a gravírování
- Široké spektrum výkonu (obvykle od 40 W do 180 W)
- Životnost 10 000 h
- Není potřeba doplňovat plyn
- Vysoká cena (40W- 3 500 Kč až 100W- 25 000 Kč)
- Bezpečné záření, stačí čiré sklo pro ochránění zraku

Nevýhody:

- Požadované velmi vysoké napětí, nebezpečí úrazu
- Nutnost vodního chlazení
- Náchylnost jak na vysoké, tak na nízké teploty, ideální jsou 18-25 °C
- Křehkost trubice
- Velmi vysoký reakční čas – 1ms
- Velké rozměry trubice

#### **RF (Radio Frequency) CO2 laser:**

Tělo je z kovu s hermeticky uzavřenou komorou naplněnou aktivním plynem. Zdroj excitace je zde přesně řízenou radiofrekvenční energií. Vlnová délka lze ladit v rozmezí 9,3-10,6  $\mu\text{m}$  a fungují v pulzním režimu. [18], [19]

- Široké spektrum výkonu (obvykle od 30 W do 100 W)
- Životnost do 20 000 hodin

- Může být vyměněn plyn aktivního prostředí a zvýšit tak životnost
- Díky kovovému tělu můžou některé modely být chlazeny pouze vzduchem
- Rychlý reakční čas
- Bezpečná vlnová délka

Nevýhody:

- Vysoká cena (30W- 35 000 Kč až 100W- 313 000 Kč)
- Možnost chladit vzduchem do vyšších teplot
- Vyšší náklady na údržbu, například pravidelné čištění optických čoček

### **Výběr nejvhodnějšího laseru**

Z popisu výhod a nevýhod je patrné, že i když se jedná o stejné aktivní prostředí, rozdíly jsou veliké, způsobené zdrojem excitace. Když uděláme výpis hlavních kladů a záporů, dostaneme se jako první k ceně. DC provedení laseru stojí kolem 10 % z ceny RF laseru při stejném výkonu. Je sice fakt, že RF má delší životnost, nicméně stále bude méně nákladná vyměněna DC laserové trubice ve stroji než pořízení jedné RF trubice.

Jako další je nutné zmínit, že RF má sice díky konstrukci možnost chlazení vzduchem, nicméně to platí u provedení do přibližně 60 W, poté je také nutné v případě dlouhého řezání nutnost zapojit vodní okruh. Zde je potřeba zmínit, že přesto, že do určitého výkonu lze chladit kovové provedení vzduchem, svádí to k tomu si myslet, že RF laser bude mít menší tepelné ztráty oproti DC, ale zde je opak pravdou. DC laser je potřeba chladit kapalinou z konstrukčních důvodů, kdy se projevuje nejvíce nevýhoda skleněného těla laseru, nicméně DC provedení oproti RF má skoro 4x menší tepelné ztráty, což si ukážeme v kapitole o chlazení

Dále je zde výhoda RF laseru, který má menší bod, do kterého může zaostřit (0,1mm), na rozdíl od DC (0,2mm).

Výhoda RF je zajisté také v robustnosti konstrukce, která není tak křehká, jako DC skleněná, nicméně většinou se volí konstrukční řešení, kde je trubice ve statické poloze upevněna v oddělené části stroje, do které se během práce se strojem nedostaneme a nemůžeme tak fyzicky poškodit trubici. Reakční čas trubice znamená, za jak dlouho dokáže paprsek opustit komoru a zde dominuje RF laser, což v praxi znamená, že se rychlost gravírování zvýší, nicméně na samotné řezání reakční čas účinek nemá.

Když tedy vezmeme všechny výhody a nevýhody, tak jako vhodnější laser do hobby CNC řezáku je DC provedení CO2 plynového laseru.[19]

### **1.12.3 Vedení paprsku**

Laserový paprsek se vede pouze pomocí zrcadel seřazených tak, aby dokázali dovést paprsek co všech koutů CNC stroje. Zrcadla jsou křemíková a mají napařenou vrstvu zlata, která zaručuje co nejvyšší možnou odrazivost paprsku. Čím vyšší je odrazová hodnota, tím méně výkonu ztratíme a tím méně se budou zrcadla zahřívat. Tato hodnota se pohybuje od 98 do 99,8 %.[5], [8]

### **1.12.4 Řezací hlava**

Když je zrcadly doveden paprsek k řezací hlavě, je usměrněn pomocí čočky uvnitř laserové hlavy do malého bodu. Základní funkce laserové hlavy je tedy držet čočku na jednom místě v přesné vzdálenosti od materiálu. Také je sem přiváděn vzduch, aby ochránil tuto zaostřovací čočku před výpary a ofukoval materiál ve směru paprsku, aby kouř nesnižoval výkon laseru. [8]

### **1.12.5 Chlazení**

Správné chlazení DC CO<sub>2</sub> laseru je velmi důležité a dá se říct, že teplota kapaliny je nejdůležitějším faktorem, při řezání, jelikož při nepřetržitém řezání okolo 80-100 % se laserová trubice velmi rychle zahřívá a je potřeba toto teplo odvádět, aby se teplota kapaliny udržovala v rozmezí od 15 do 25 °C. V případě, že by teplota byla pod 15 °C (především zimní období), mohla by trubice rozdílem teplot prasknout a když je teplota nad 25 °C, dochází k výraznému snižování životnosti (může vést až k vyhoření). Zároveň musí být kapalina proudící trubicí bez vzduchových bublin, protože kdyby se bublina zasekla na jednom místě průchodem skrze trubicí, vytvořila by tepelný šok a v tom místě by sklo prasklo.

Rozlišujeme dva typy chlazení a tím je aktivní a pasivní. Pasivního chlazení se u tohoto druhu laseru nevyužívá, jelikož s pasivním chlazením nikdy nelze dosáhnout teplot nižších, než je teplota okolního vzduchu (reálně tak 1-2 °C nad), takže by nebylo možné používat laser v teplých letních dnech. Musí se tedy jednat o aktivní chladič. První typ provedení může být okruh s výměníkem tepla, na kterém je připevněný ventilátor a funguje jako chladič u automobilu. Pomocí tepelného senzoru umístěného v kapalině se pak regulují otáčky ventilátoru.

Druhý typ aktivního chlazení je systém chlazení založeném na principu kondenzace, který je využíván u lednic, klimatizací, mrazáků. V nejčastějším případě výrobci dodávají ke

svým laserovým řezákům právě tyto průmyslové chladiče, které pracují na principu kondenzace. Pouze stačí propojit trubici s chladičem a ten si pak sám reguluje teplotu okruhu. Ve většině případů není chladičí jednotka součástí stroje, ale umísťuje se na zem vedle stroje, čímž zabírá zbytečně další místo a když je potřeba stroj přemístit, musí být okruh chladičí kapaliny přerušen.[20] Nicméně existují i případy, jako například u strojů značky AEON, kdy tento chladič je integrován ve stroji. [17]

Nevýhodou druhého řešení je, že nelze koupit díly, vytvořit chladičí okruh a například při zvyšování výkonu laseru (například dokoupením druhé laserové trubice a pomocí optického prvku je spojit dohromady) jen dokoupit další výměníky tepla, jako by tomu bylo u prvního řešení, ale musí se koupit chladič speciálně navržený pro chlazení DC laserové trubice o určitém chladičím výkonu a při zvyšování výkonu laseru by musel být dokoupen i další chladič.

Dále by měla být do chladičího okruhu zapojena i jednotka pro ohřev vody v případě, že se teplota okolí pohybuje pod  $15^{\circ}\text{C}$ . Touto jednotkou není vybaven ani průmyslový chladič a musí tak být přidána do okruhu samostatně. Nejlevnější řešení je do okruhu přidat topné tělísko pro ohřev vody v akváriu. Je důležité, aby se voda nejdříve zahřála a nedošlo tak k prasknutí trubice. Jelikož je v laseru velmi vysoké napětí, je důležité používat k chlazení pouze destilovanou vodu z hlediska bezpečnosti

## **Odpadní teplo**

V případě, kdy by byla zvolena první možnost aktivního chlazení, musíme znát energii, kterou je potřeba chladit a určit tak plochu výměníku tepla a jak by se v závislosti na otáčkách teplota měnila. V návaznosti na předchozí kapitolu o volbě laseru porovnáme DC a RF verzi laseru a spočteme jejich tepelné ztráty.

Pro porovnání si výstupní optický výkon laserů si zvolíme 100 W a můžeme všechny parametry vidět na obrázku 24 a 25.

Obr 24 Parametry 100 W DC CO2 laserové trubice [33]



**Specifikace**

- Výkon: 100W
- Délka: 1430 mm
- Průměr paprsku: 2,5 mm
- Vlnová délka: 10,6 mikronů
- Materiál: borosilikátové sklo
- Vnější průměr: 80 mm
- Spouštěcí napětí: 26KV
- Pracovní napětí: 20KV
- Optimální provozní proud: 7-40mA
- Hrubá hmotnost: 16,46 kg (36,281 liber)
- Velikost balení: 161 x 32 x 27 cm / 63,38 x 12,59 x 10,62 palce



Obr 25 Parametry 100 W RF CO2 laserové trubice [32]

Wavelength	10.6±0.1µm	9.3±0.1µm
Output Power	≥100W	≥80W
Laser Output Power Range	1-100W	1-80W
Power Stability	±7%	
Beam Size (1/e <sup>2</sup> )	2.0±0.3mm	
Divergence (Full Angle)	≤7.0mrad	
Beam Quality (M <sup>2</sup> )	<1.2	
Ellipticity	<1.2	
Polarization	Linearly polarized, perpendicular to the base	
Modulation Frequency	1-100KHz	
Duty Cycle	1%-100%	
<b>Input &amp; Cooling Requirements</b>		
Voltage	48VDC	
Max. Current	40A	
Max. Thermal Load	2000W	
Coolant Flow Rate	>6lpm	
Coolant Temperature Range	18-25°C(64.4-77°F)	
Cooling Water	Deionized neutral water	
<b>Working Requirements</b>		
Cabinet Temperature	5-45°C(45-113°F)	
Cabinet Humidity	<95%, No Condensation	

**DC laser**

Vstupní pracovní napětí: 20 000 V

Vstupní pracovní proud: 0.03 A

**RF laser**

Vstupní pracovní napětí: 48 V

Vstupní pracovní proud: 40 A

**Příkon:**

$$P=20\ 000*0.03$$

$$P=600\ W$$

$$P=48*40$$

$$P=1920\ W$$

Tepelné ztráty se poté vypočítají jako příkon méně výkon a dostaneme:

**500 W**

**1820 W**

Tímto jednoduchým výpočtem lze zjistit, jaké množství energie je potřeba odvádět v podobě tepelných ztrát.

**1.12.6 Rozměry stroje**

Rozměry středně výkonných laserů s uzavřenou konstrukcí je ideální pro spoustu uživatelů. Tato velikost je dostatečně velká na řezání většiny druhů materiálu a lze konstrukčně stroj navrhnout tak, aby byly průchozí stěny a mohl být tak vložen delší materiál, než je řezací plocha. Zároveň svou velikostí nezabírá zbytečně moc místa v dílně a dá se pohodlně pronést vchodovými dveřmi.

### **1.12.7 Kompresor**

Používá se pro vytváření kontinuálního proudu vzduchu, který je přiváděn do laserové hlavy. Zde je následně veden do místa řezu a chrání tak zaostřovací čočku. Také proudem vzduchu, vystupující z trysky laserové hlavy, prochází laserový paprsek a není tak rozptylován a snižován jeho výkon. Dále se díky proudu vzduchu u některých lehce hořlavých materiálů, jako je například dřevo, zamezí vznícení a také pomáhá chladit řezaný materiál. Pro tento účel se používají kompresory s velkým průtokem vzduchu kolem 120 L/min.

### **1.12.8 Zdroj pro DC CO2 laser**

Jak bylo předvedeno v kapitole chlazení, je potřeba velmi velké napětí k tomu, aby aktivním prostředím v případě DC CO2 laseru prošel elektrický výboj a excitoval tak laserové prostředí. Podle výkonu trubice volíme příslušný zdroj. [18]

### **1.12.9 Motory**

Pro CNC systémy se používají krokové synchronní motory, které jsou většinou napájeny impulzy stejnosměrného proudu. Magnetické pole je generováno postupným napájením jednotlivých pólových dvojic. Pohyb rotoru krokového motoru je při nízkých rychlostech nespojitý, rotor se pohybuje mezi stabilními polohami vždy v určitém úhlu – mluvíme o pohybu v krocích. Standardní velikost kroku je 1.8°, nicméně existují i modely s krokem 0.9°. Podle požadovaných rychlostí se volí vhodný typ motoru. [21]



### 1.12.10 Pojezdy

Nejběžnějším systémem pojezdů jsou takzvané kolejnice lineárního vedení s vozíkem, které jsou umístěny na nosníku, Viz obr. 26 a 27. Nicméně u CNC systémů o menších rozměrech se mohou použít i bez podpěrného nosníku a mohou tak fungovat bez omezení. Domek, který jezdí po kolejnici je vybaven kuličkami, které se odvalují a zamezují tak tření. Vyznačují se přesnou tolerancí a snesou vysoké rychlosti. [22], [23]

Obr 26 Domek lineárního vedení [22]



Obr 27 Systém kolejnic lineárního vedení [23]



### 1.12.11 Pohon

V osách X a Y je pohyb po osách zajištěn pomocí lineárních kolejnic a řemeny. V ose Z se pohybuje řezný stůl na trapézových pohybových šroubech nikoliv laserová hlava, aby bylo zajištěné stálé zaostření paprsku do jednoho bodu. Typy konstrukcí se mohou lišit v počtu pohyblivých šroubů v ose Z, nicméně je zde použit jeden krokový motor, který je pomocí řemenového převodu spojen se všemi šrouby a tím je zaručeno, že se všechny budou pohybovat v jednom směru o stejný počet otáček. Krokový motor v ose Z není vždy samozřejmostí a u levnějších modelů zde motor není vůbec žádný a pohyb v ose Z je prováděn ručně, jelikož v průběhu řezání zůstává vzdálenost osy Z stejná.

### 1.12.12 Opláštění stroje

Vlnová délka CO<sub>2</sub> plynových laserů má výhodu v tom, že záření nepronikne sklem, akrylem a ani polykarbonátem bez toho, aniž by musela být nanesena ochranná vrstva proti této vlnové délce. [2] Takže lze použít jak tyto transparentní materiály, tak i netransparentní materiály. Je důležité z hlediska zdravotní stránky uzavření řezaného materiálu a následného odvodu spalin, jelikož se jedná o výpary řezaných materiálů, které mohou být někdy jedovaté.[5], [8]

### 1.12.13 Odsávání

Slouží k odvodu spalin pryč z uzavřené konstrukce stroje. Průtok vzduchu se volí v závislosti na objemu konstrukce laseru. Rozlišujeme dvě řešení a to sice, že zplodiny odvádíme potrubím do venkovního prostředí, nebo výpary putují přes filtr. Nicméně výrobci volí možnost první, sice odvod zplodin ven do ovzduší bez jakékoliv filtrace, a to i navzdory tomu, že výpary mohou být jedovaté. Je tedy důležité zakomponovat k laserovému řezacímu stroji ještě filtrační jednotku z hlediska ekologie a ochraně ovzduší.

### 1.12.14 Doplnky

Jako nejvíce užitečný doplněk je beam combiner, uvedený na obrázku 28. Jedná se o optický prvek, který, jak název napovídá, kombinuje více paprsků. Slouží k tomu, že spojí paprsek diodového laserového ukazovátka s okruhem, kde putuje až k materiálu, abychom před řezáním materiálu viděli, zda paprsek půjde mimo materiál, nebo se řezaný objekt do materiálu vejde. Princip spočívá v tom, že máme sklo nakloněné v o 45 ° oproti laserovému paprsku, kterému toto sklo stojí v cestě. Díky vlnové délce CO2 laseru paprsek, projde skrz toto speciální sklo bez ztráty výkonu, a jelikož je sklo opatřené speciální vrstvou, která odráží viditelné vlnové délky, diodový laser se odrazí a putuje ve stejném směru, jako paprsek z CO2 laseru. Tento doplněk nahradí laserová ukazovátka umístěná na řezací hlavě, které nejsou tak přesné a zbytečně zvyšují hmotnost řezané hlavy. [5], [24]

*Obr 28 Beam combiner [34]*



## Závěr

V první části se práce věnuje stručnému výtahu nejdůležitějších momentů z historie vzniku laserového paprsku a pak plynule přechází na vysvětlení funkce laserového paprsku, jak paprsek vzniká, co potřebujeme pro to, abychom mohli vytvořit laserový paprsek a také jeho nejdůležitější vlastnosti.

Následuje kapitola o rozdělení laserů, kde je zpočátku podrobněji popisována funkce vzniku laserových paprsků v závislosti na jejich složení a materiálu aktivního prostředí. Na to navazuje jiné nejběžnější dělení podle vlnové délky, výkonu, zdroje excitace. K tomu je popisována funkčnost a za jakých podmínek je laser zařazen právě do této kategorie.

Jako další téma je zde řešena interakce laserového paprsku s materiálem, na čem vlastně závisí obrobitelnost materiálu, jak probíhá samotné řezání a poté následuje podrobný popis dělení materiálů, podle požadavku výsledného dílu z hlediska technologického ovlivnění materiálu laserem.

V neposlední řadě jsou zde rozebírány již existující konstrukční provedení laserových řezacích strojů od těch nejméně výkonných, až po ty, které jsou vhodné pro největší škálu materiálu. Je zde i výčet výhod a nevýhod a především cena, v jakém rozmezí lze stroj pořídit.

Následuje teoretické vybírání komponentů pro vlastnostmi nejlepší stroj, které by bylo možné zkonstruovat. Na popisu těchto částí laseru je zároveň možné vidět, na co se zaměřit při konstruování takového to stroje a je také je popsána funkce těchto částí, aby byl popis konstrukce takového to laseru kompletní.

Na toto téma by autor práce chtěl navázat v diplomové práci.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] „Ateizr V35 PLUS 35W Laser Engraver with KA and KE Set [Pre-sale]". Dostupné z: <https://ateizr.com/products/ateizr-v35-plus-35w-laser-engraver-with-ka-and-ke-set> (viděno 20. březen 2023).
- [2] „Understanding Lasers - An Entry Level Guide, Fourth Edition : Hecht, J : Dostupné z: [https://www.bookshop.cz/john-wiley-and-sons-ltd/understanding-lasers-an-entry-level-guide-fourth-edition/?gclid=Cj0KCQiApKagBhC1ARIsAFc7Mc6tu9kvmlMA5Xb4nCAKKTfPNoYKcniYJaBwN3n2o-LUNVi0nQN\\_H\\_UaAtETEALw\\_wcB](https://www.bookshop.cz/john-wiley-and-sons-ltd/understanding-lasers-an-entry-level-guide-fourth-edition/?gclid=Cj0KCQiApKagBhC1ARIsAFc7Mc6tu9kvmlMA5Xb4nCAKKTfPNoYKcniYJaBwN3n2o-LUNVi0nQN_H_UaAtETEALw_wcB) (viděno 10. březen 2023).
- [3] Mario. Bertolotti, „The history of the laser", s. 307, 2005.
- [4] „Zpracování materiálů pomocí laseru - MATURITA.CZ". Dostupné z: <http://www.maturita.cz/referaty/referat.asp?id=1358> (viděno 20. březen 2023).
- [5] J. C. Ion, „Laser processing of engineering materials : principles, procedure and industrial application", s. 556, 2005.
- [6] „How Lasers Work | HowStuffWorks". Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/laser.htm> (viděno 22. únor 2023).
- [7] „Difference Between Absorption and Emission". Dostupné z: <https://pediaa.com/difference-between-absorption-and-emission/> (viděno 30. březen 2023).
- [8] W. M. Steen, „Laser Material Processing", *Laser Material Processing*, 2003,
- [9] W. M. Steen a J. Mazumder, „Laser material processing", s. 558, 2010.
- [10] M. Vrbová, H. Jelínková, a P. Gavrilo, „Úvod do laserové techniky", s. 228, 1998, Viděno: 31. březen 2023. [Online]. Dostupné z: [https://www.academia.edu/16208596/%C3%A9vod\\_do\\_laserov%C3%A9\\_techiky](https://www.academia.edu/16208596/%C3%A9vod_do_laserov%C3%A9_techiky)
- [11] „(239) Úvod do laserové techniky a praktické aspekty laserového obrábění: Díl 1 - Jak funguje laser - YouTube". Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=cz2QR1qsbsc&t=4709s&ab\\_channel=PetrHauschwitz](https://www.youtube.com/watch?v=cz2QR1qsbsc&t=4709s&ab_channel=PetrHauschwitz) (viděno 31. březen 2023).
- [12] „WAINLUX Laser Engraver and Cutter, DIY Laser Module Kits – Wainlux". Dostupné z: <https://www.wainlux.com/> (viděno 31. březen 2023).
- [13] „(184) More Powerful Ateizr V35 SIX-beam Diode Laser Engraver With 35W Optical Power. Cutting Wood 35,5mm - YouTube". Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=IoTFNYzcx\\_g&ab\\_channel=kukomio](https://www.youtube.com/watch?v=IoTFNYzcx_g&ab_channel=kukomio) (viděno 20. březen 2023).
- [14] „Gravírky - FOTOVĚCI". Dostupné z: <https://www.fotoveci.cz/gravirky-4/> (viděno 20. březen 2023).

- [15] „Gweikecloud ". Dostupné z: <https://www.gweikecloud.com/products/gweikecloud-desktop-3d-laser-printer> (viděno 20. březen 2023).
- [16] „Meet Glowforge | Glowforge". Dostupné z: <https://glowforge.com/products> (viděno 21. březen 2023).
- [17] „Co2 Laser Engraver, Plywood Laser Cutter, Paper Cutting Machine - AEON". Dostupné z: <https://www.aeonlaser.net/> (viděno 31. březen 2023).
- [18] „Laserová trubice DC (sklo) nebo RF (kov) CO2? Co je lepší - cenově dostupné stroje s CO2 a vláknovým laserem". Dostupné z: <https://lasergraaf.nl/cs/archief/dc-glas-of-rf-metaal-co2-laserbuis-welke-is-beter/> (viděno 28. březen 2023).
- [19] „Jaký je rozdíl mezi lasery DC (skleněné trubice) a RF (kovové kazety)?" Dostupné z: <https://lasergraaf.nl>
- [20] „laserové chlazení - energeticky pasivní nebo aktivní - cenově dostupné CO2 a vláknové laserové stroje". Dostupné z: <https://lasergraaf.nl/cs/laser-koeling-vermogen-passief-of-actief/> (viděno 31. březen 2023).
- [21] „Základní principy krokových motorů - Portál pro strojní konstruktéry". Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/zakladni-principy-krokovych-motoru> (viděno 31. březen 2023).
- [22] „Lineární vozík MTN (MGN) - Sharplayers". Dostupné z: <https://eshop.sharplayers.cz/p/linearni-vozik-mtn> (viděno 31. březen 2023).
- [23] „Kolejnice lineárního vedení 400mm s vozíkem MGN12H | LaskaKit". Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/kolejnice-linearniho-vedeni-400mm-s-vozikem-mgn12h/> (viděno 31. březen 2023).
- [24] „How to add beam combiner to SH-G350 laser cutter - LensDigital". <https://www.lensdigital.com/home/how-to-add-beam-combiner-to-sh-g350-laser-cutter/> (viděno 31. březen 2023).
- [25] „Stavba atomu. - ppt stáhnout". Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3068715/> (viděno 30. březen 2023).
- [26] „Difference Between Absorption and Emission". Dostupné z: <https://pediaa.com/difference-between-absorption-and-emission/> (viděno 31. březen 2023).
- [27] „LASER COMPONENTS Germany". Dostupné z: <https://www.lasercomponents.com/de-en/> (viděno 31. březen 2023).
- [28] C. Coldren a J. Harris, „Group III-arsenide-nitride long wavelength laser diodes /", led. 2005.
- [29] „Impresión 3D y tecnología | Hardware libre". Dostupné z: <https://www.hwlibre.com/> (viděno 31. březen 2023).

- [30] J. D. Williams, „Lasers Chapter 1 : Introduction to the LASER", č. 256, 2010.
- [31] T. Nakano, „Selective Laser Melting", 2020, s. 3–26.
- [32] „SPT Laser: Make Great CO2 lasers for the world". Dostupné z: <https://www.sptlaser.net/> (viděno 31. březem 2023).
- [33] „Beijing Reci Laser Technology Co., Ltd." Dostupné z: <http://www.recilaser.com/en/> (viděno 31. březem 2023).
- [34] „China Laser Marking Machine, Laser Cutting Machine, Laser Machine Parts Manufacturers, Factory - KINDLELASER". Dostupné z: <https://www.kindlelaser.com/> (viděno 31. březem 2023).