



# DIPLOMATERV

*Feladat címe:*

## CO<sub>2</sub> lézervágó gép rezonátorainak tervezése

*Készítette:* **HOLLÓSI GÁBOR**

*Egyetemi szintű, gépészmérnök szakos  
Szerszámgéptervezői és Gépgyártástechnológiai szakirányos hallgató*

*Tervezésvezető:* **DR. TAKÁCS GYÖRGY**

*egyetemi docens*

*Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke*

*Konzulens:* **DR. SZILÁGYI ATTILA**

*egyetemi adjunktus*

*Miskolci Egyetem Szerszámgépek Tanszéke*

*Ipari konzulens:* **JAKAB GYULA GÁBOR**

*Gépészmérnök*

*Miskolc, 2015. december*

## Tartalom

DIPLOMATERV .....	2
Eredetiségnyilatkozat .....	5
Angol nyelvű összefoglaló / Summary .....	6
Jelölések jegyzéke .....	7
A diplomatervben szereplő képletek jegyzéke .....	8
1. Bevezetés.....	9
2. A lézertechnológia alapjai .....	10
2.1. A lézer fizikai alapjai [2] [3] .....	10
2.1.1. Az abszorpció.....	10
2.1.2. A spontán emisszió.....	11
2.1.3. Az indukált emisszió .....	11
2.1.4. A populáció-inverzió.....	11
3. A lézerfény minőségi jellemzői.....	13
3.1. A lézersugár általános jellemzői [3].....	13
3.2 A sugárminőség jellemzésének fizikai háttere – a Gauss-nyaláb és a K érték [4].....	13
3.3. Divergencia .....	18
3.3. Polarizáció.....	19
4. A lézerrezonátorok általános felépítése és főbb ipari típusai .....	21
4.1. A rezonátoregység és működésének alapjai [1] .....	21
4.2. Az ipari lézerrezonátorok főbb fajtái .....	23
4.2.1 A gázlézerek .....	23
4.2.2 A szilárdtest-lézerek .....	24
4.2.3. Fiber vagy CO <sub>2</sub> lézer? .....	25
5. CO <sub>2</sub> lézerrezonátorok általános felépítése és típusai.....	28
5.1. A rezonátor általános felépítése .....	28
5.2. A rezonátorüreg és a lézermédium[5][6] .....	28
5.3. Optikai eszközök a rezonátorban .....	30
5.3.1. Zárótükör.....	30
5.3.2. Kicsatoló tükör .....	31
5.3.3. Sugárterelő tükör .....	31
5.4. Általános kialakítások és fajták[8] .....	31
5.4.1. Lassúáramlású axiális rezonátorok.....	32
5.4.2. Gyorsáramlású axiális rezonátorok .....	33
5.4.3 Kereszt- és gyorsáramlású rezonátor.....	35
5.4.4. Diffúzióhűtéses lézerrezonátor.....	36
5.5. Konstruktív elvek.....	38
5.5.1. A rezonátor belső elrendezése.....	38
6. A lézerrezonátor tervezése .....	40
6.1. A tervezés alapja és céljai .....	40



6.2. Geometriai összefüggések [8][12] .....	40
6.3. Kialakítási elvi bemutatása.....	44
6.3. A rezonátor főbb elemei és kiegészítői .....	46
6.3.1 A rezonátorcső és a hűtőköpeny.....	46
6.4.2. Optikai elemek a rezonátorban és azok tartóelemei.....	48
6.4.3. Áramellátás és bevezetések .....	50
6.4.3.1. Anód kialakítása és beépülése.....	51
6.4.3.2. A katód kialakítása és beépítése.....	52
6.4.4. Gázok a rezonátorban.....	54
6.4.4.1 Gázfajták és arányaik .....	54
6.4.4.1. Rezonátorgázok tisztasági követelményei [4].....	55
6.4.4.1. Rezonátorgázok szennyezői [4] .....	55
6.4.4. Hűtővíz és hűtőrendszer .....	56
Összegzés .....	59
Forrásjegyzék .....	60
Ábrák forrásjegyzéke .....	62
Tervek, műszaki rajzok jegyzéke .....	63



## Eredetiségnyilatkozat

Alulírott *Hollósi Gábor*, Neptun-kód: *CZBAJW*, a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős *Egyetemi szintű, gépészmérnök szakos, szerszámgéptervezői és gépgyártástechnológiai szakirányos* hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy  $\text{CO}_2$  lézervágógépek rezonátorai és lézerrezonátor tervezése című diplomatervem saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt. Tudomásul veszem, hogy diplomaterv esetén plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül, tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén diplomatervem visszautasításra kerül.

Miskolc, 2015. december 11.

.....  
Hallgató

## Angol nyelvű összefoglaló / Summary

The basic theoretical principles of the laser technology were already described by Albert Einstein at the beginning of the previous century, and he constructed a generally applicable system which was, however, developed for practical use only in the 1960s. The first operational laser was a ruby laser to be attributed to Theodore Harold Maiman, and his work can be regarded as the starting point of a very intensive development in the field of the laser technology.

In the 1970s, laser working systems were put on the market that provided a wider range of advantages compared to the existing alternative technologies and opened up completely new opportunities for application. Similarly to personal computers, development has not stopped in this field, either. As of today, the laser technology has reached almost all areas of economic and private life. A few examples therefor: in telecommunication laser controlled optical fibre technology is being applied, data are recorded by laser, and scanners, code lasers, CD players, remote controls and similar devices all use laser. Nevertheless, the aforementioned applications require only a lower laser power which would be too weak for cutting or carving e.g. metal workpieces.

The core of my thesis is the design of a slow-flow resonator unit. My target is to prepare the concept and the drawings of a resonator block with a compact size, being modular and suitable for a multitude of tasks, pre-eminently the cutting and marking of thinner panel materials.

With a view to optimize the size of the resonator unit, for the laser tube I would apply a beam transport with deflector mirrors which solution is based on principles similar to the ones underlying the resonator units of currently highly regarded laser machines.

## Jelölések jegyzéke

Jelölés	Mértékegység	Fizikai fogalom
<b>I</b>	[W/mm <sup>2</sup> ]	Sugárintenzitás
<b>d</b>	[mm]	Gauss nyaláb sugárkeresztmetszet átmérője (sugárderék)
<b>w</b>	[mm]	Gauss nyaláb sugárkeresztmetszetének rádiusza (sugárderék rádiusza)
<b>I<sub>max</sub></b>	[W/mm <sup>2</sup> ]	Sugárintenzitás maximuma
<b>r</b>	[mm]	Sugárintenzitás maximumához tartozó keresztmetszeti sugár
<b>P</b>	[W]	Sugárteljesítmény
<b>d(z)</b>	[mm]	Rayleigh-távolság
<b>λ</b>	[mm]	Hullámhossz
<b>Θ</b>	[mrad]	Divergencia
<b>BPP</b>	[mm]	Sugárparaméter szorzat
<b>K</b>	[-]	Sugárnyaláb teljesítmény
<b>M</b>	[-]	Sugárterjedési faktor
<b>R<sub>1</sub></b>	[mm]	Zárótükör görbületi sugara
<b>R<sub>2</sub></b>	[mm]	Kicsatoló tükör görbületi sugara
<b>L</b>	[mm]	a rezonátor két tükre közötti távolság
<b>q<sub>1</sub></b>	[-]	Görbületi paraméter (1)
<b>q<sub>2</sub></b>	[-]	Görbületi paraméter (2)

## A diplomatervben szereplő képletek jegyzéke

- (1.) Sugárintenzitás
- (2.) Sugárnyaláb teljesítmény
- (3.) Sugárnyaláb átmérő
- (4.) Rayleigh-távolság
- (5.) Sugárnyaláb divergenciája
- (6.) Sugárparaméter-szorzat (BPP)
- (7.) Gauss-nyaláb BPP értéke
- (8.) A sugárderék-átmérő eltérése az ideális értéktől (M faktor)
- (9.) A lézersugár minőségének mértéke (K)
- (10.) Görbületi paraméterek
- (11.) Sugárnyaláb-teljesítmény

## 1. Bevezetés

A lézer elvét Albert Einstein már a múlt évszázad kezdetén leírta és egy általánosan használható rendszert alakított ki, azonban elvei alapján ez csak az 1960-as években került kifejlesztésre. Az első működő lézer egy rubin lézer volt, mely az amerikai Theodore Harold Maiman nevéhez fűződik, innen indult igazából a rohamos fejlődése a technológiának.

Az 1970-es években lézeres megmunkáló rendszereket dobtak piacra, amelyek szélesebb technológiai sávon nyújtottak előnyöket a meglévő technológiáknál, valamint teljesen új alkalmazási lehetőségeket nyitottak meg. Hasonlóan a személyi számítógépek területéhez, a fejlődés még itt sem ért véget. Mára a lézertechnika a gazdasági és privát élet valamennyi területét elérte. Néhány példa: a telekommunikációban lézervezérelt üvegszálak technológiát alkalmaznak, a keletkezett adatokat lézer jegyzi fel, a szkennerek, a kódlézerek, a CD lejátszók, a távvezérlések és a hasonló berendezések mind lézert használnak. Ezek az alkalmazások csak alacsony lézer teljesítményt igényelnek, és ez túl kicsi pl. fém munkadarabok megmunkálásához.

Diplomatervem gerincét egy lassúáramlású rezonátor egység tervezése alkotja majd, melynek lényege, hogy olyan kompakt, kisméretű rezonátor blokkot tervezek, amely moduláris és sokféle lézerfeladat ellátására képes, gondolok itt kisebb lemezvastagságú anyagok vágására, jelölésre. Méreteinek optimalizálása miatt a lézercsővet törve, terelőtükrök nyalábvezetésével oldanám meg, amely megoldás a mostani, magasabb technológiai színvonalat képviselő lézergépek rezonátoregységeiben alkalmazotthoz hasonló elveken nyugszik.

## 2. A lézertechnológia alapjai

A lézer kifejezés az angol Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kifejezésből ered, az ebből képzett „LASER” mozaikszó magyar kiejtésű változata. Az eredeti kifejezés egyik lehetséges fordítása: „fényerősítés sugárzás indukált kibocsátása útján”.<sup>[1]</sup>

A jelen 2. fejezetben rövid áttekintést nyújtok a lézertechnológia általános fizikai háttéréről, amely egyben magyarázattal szolgál a lézer eredeti elnevezésében szereplő fogalmakra – a fényerősítésre és a stimulált (indukált) emisszióra – is.

### 2.1. A lézer fizikai alapjai [2] [3]

Az elektronok alapállapotukban a lehetséges legalacsonyabb energiaszinteket foglalják el, azonban valamilyen fizikai hatás következtében magasabb energiaszintekre is kerülhetnek, ami által szabadon hagynak néhány alacsonyabb energiaszintet. Az elektronok energia elnyelésével vagy kibocsátásával válhatnak egyik energiaszintről a másikra. Az energiaszintek közötti átmenetet radiatív átmenetnek nevezzük, amelyből három típusút különböztetünk meg: az abszorpciót (elnyelést), a spontán emissziót és a stimulált (vagy indukált) emissziót.

#### 2.1.1. Az abszorpció

Az elektronok különböző külső forrásokból nyelhetnek el energiát, amely energia-utánpótlásnak a lézer működése szempontjából az alábbi két módja a leglényegesebb:

1. Egy foton teljes energiájának átvitelre kerülhetnek egy keringő elektronba. Az elektront az energiájának megnövekedése magasabb energiaszintre való ugrásra készíti. ekkor az atomról, illetve molekuláról azt mondjuk, hogy *gerjesztett* állapotban van. Az elektron csak pontosan meghatározott energiamennyiség hatására ugrik egyik energiaszintről egy másikra, ezért csak az elektron számára „elfogadható” energiájú vagy hullámhosszú fotonok nyelődhetnek el.
2. Az abszorpció második módja egyfajta elektromos kisülés. ebben az eljárásban az energiát elektromos mező által gyorsított elektronok ütköztetésével biztosítják.

Az eredmény mindkét típusú gerjesztésnél az, hogy az energia elnyeléséből következően egy elektron a korábbinál magasabb energiaszintre kerül. Az atomot, amelyhez a magasabb energiaszintre került elektron tartozik, az elektronhoz hasonlóan gerjesztettnek nevezzük.

### 2.1.2. A spontán emisszió

Az egész atomi szerkezet a lehető legkisebb energiájú állapotra törekszik, ezért egy gerjesztett atom többféle módon próbálja magát „visszagerjeszteni”, például az energia bizonyos része hővé alakul vagy egy foton spontán kibocsátására (emissziójára) kerülhet sor. Utóbbit – a foton spontán felszabadulását – nevezzük spontán emissziónak. A kibocsátott foton energiája egyenlő az atom gerjesztett és alacsonyabb energiájú állapota között fennálló energiakülönbséggel.

### 2.1.3. Az indukált emisszió

Albert Einstein már 1917-ben felvetette, hogy amennyiben egy gerjesztett atomból felszabaduló foton kölcsönhatásba lép egy másik, ugyanígy gerjesztett atommal, egy foton felszabadítása útján előidézhetheti ennek a másik atomnak a visszagerjesztését. A másik atomból felszabaduló foton frekvenciája, energiája, iránya és fázisa azonos a hatást kiváltó fotonéval. A hatást kiváltó foton változatlanul folytatja útját, tehát míg kezdetben egy foton volt a rendszerben, immáron kettőről beszélünk. Ez a két foton további atomokat is emisszióra stimulálhat, és ha egy megfelelő közeg megfelelően sok gerjesztett atomot tartalmaz, amelyek visszagerjesztődése csak spontán emisszióval történik, a kibocsátott fény véletlenszerű és minden irányban körülbelül azonos erősségű lesz.

A stimulált vagy más néven *indukált* emisszió gyakorlati jelentőségét éppen az adja, hogy segítségével azonban megnövelhető az egy meghatározott irányban haladó fotonok száma. Ha egy optikai üreg két végére tükröket helyezünk, azáltal kijelölhetünk (preferálhatunk) egy bizonyos irányt, hiszen azok a fotonok, amelyek nem a tükrökre merőleges irányba haladnak, kiszöknek az optikai üregből. Ennek eredményeként az optikai üreg két végén elhelyezett tükrök tengelye mentén haladó fotonok száma nagymértékben megnövekszik, és stimulált sugárzás-kibocsátás útján fényerősítés történik.

### 2.1.4. A populáció-inverzió

Az indukált emissziós eljárás azonban nemhogy nem hatékony, de még csak nem is lenne érdemi fényerősítő hatása, ha csak az ún. „populáció-inverzió” nem következik be. Ha több millió atom közül mindössze kettő vagy csak néhány van gerjesztett állapotban, az indukált emisszió bekövetkezésének esélye végtelenül kicsi. Minél nagyobb a gerjesztett atomok aránya, annál nagyobb a valószínűsége a stimulált emisszióknak.



Normális esetben az elektronok nagy része a legalacsonyabb energiájú állapotban van, ezáltal szabadon hagyva a felsőbb energiaszinteket. Az elektronok gerjesztése következtében azok feltöltik ezeket a felsőbb energiaszinteket, és előállhat egy olyan állapot, amikor már több atom gerjesztett, mint ahány nem gerjesztett. Ekkor mondjuk azt a gerjesztettség sűrűségéről, hogy meginvertálódott, és ún. populáció-inverzió következett be.

### 3. A lézerfény minőségi jellemzői

A lézer mögött meghúzódó fizikai alapelvek vázlatos bemutatását követően jelen fejezetben a lézersugár legfontosabb jellemzőit tekintem át.

#### 3.1. A lézersugár általános jellemzői [3]

A lézersugár tulajdonságai alapvetően határozzák meg a lézer gyakorlati alkalmazhatósági körét. A lézersugár jellemzéséhez számos tulajdonságot és értéket figyelembe kell vennünk annak érdekében, hogy a legmegfelelőbb lézerforrást tudjuk kiválasztani az általunk megcélzott ipari technológia megvalósításához. Ezek a legfontosabbak jellemzők, adatok a következők:

- az átlagos teljesítmény,
- a sugárnyaláb-átmérő,
- sugárnyaláb-divergencia (széttartás),
- szín, illetve hullámhosszúság,
- frekvencia (impulzus/s).

Speciális alkalmazási területek esetében, mint amilyen például az anyagmegmunkálás vagy a mérés-technika, további jellemzőket is számon tartanak és vizsgálnak. A lézersugár jellemzésére szolgáló jellemzőket összefoglaló néven sugárminőségi adatoknak nevezik.

Az alkalmazási céltól függően a sugárminőség alatt elsősorban a következőket értjük:

- a lézersugár időbeli és térbeli stabilitása,
- a frekvenciaspektrum szélessége,
- az időbeli és térbeli koherencia.

Az előbbi ismérvek szoros összefüggésben állnak a lézersugár fókuszálhatóságával és a munkadarab felületén elérhető teljesítménysűrűséggel, vagyis gyakorlatilag azzal, hogy lézersugár segítségével milyen hatások válthatók ki a megmunkálandó anyagon.

#### 3.2 A sugárminőség jellemzésének fizikai háttere – a Gauss-nyaláb és a K érték [4]

A sugárminőség egyik leglényegesebb viszonyítási alapja az ún. Gauss-nyaláb ( $TEM_{00}$ ), amely minimális divergenciájából eredően számos lézersugaras alkalmazás szempontjából a sugárminőség optimumát testesíti meg (a  $TEM_{mn}$  a „Transversal Electromagnetic Mode”

angol kifejezésből képzett mozaikszó, a jelölésben az  $m$  és  $n$  az eloszlás típusa, például  $TEM_{01}$ ).

Bár a Gauss-nyaláb által képviselt optimum olykor jól megközelíthető, a gyakorlatban sok lézersugár-forrás ettől kisebb vagy nagyobb mértékű elmaradást mutat. Ennek főbb okai a következők:

- a magasabb transzverzális modulusok rezgése;
- fázis- vagy amplitúdózavarok (túlnyomórészt a rezonátortér inhomogén erősítéséből eredően);
- részsugárzások kialakulása, illetve azok interferenciája;
- a rezonátor-hatásfok növelésére való törekvés.

A lézersugár divergenciája a gyakorlatban meghaladja a Gauss-nyalábét, mivel a fókuszáló lencsével csak annál nagyobb átmérőjű nyalábbá lehet fókuszálni. Ennek közvetlen következménye, hogy a fókuszban csak kisebb teljesítménysűrűséget érhetünk el. Ennek a teljesítménysűrűség-csökkenésnek a komoly gyakorlati jelentősége például a távhegesztési (remote welding) technika alkalmazásánál mutatkozik meg, mivel erre a célra csak jó sugárminőségű lézer lehet alkalmas.

A Gauss-nyaláb esetén a sugárzás haladási irányára merőleges keresztmetszetében az alábbi, 1. sz. egyenlet szerint írható le a keresztmetszet tetszőleges pontjának **sugárintenzitása** polár- és derékszögű koordináta-rendszerben ( $d = 2w$ ):

$$I(x, y) = I_{\max} \exp \frac{-2r^2}{w^2} = \frac{-8(x^2 + y^2)}{d^2} \quad (1.)$$

Az  $x$  és  $y$  koordináták a sugárterjedés  $z$  irányára merőleges síkra vonatkoznak. Forgásszimmetrikus intenzitás-eloszlásnál – így a Gauss-nyalábok esetében is – célszerűbb a polárkoordináta-rendszer alkalmazása:  $(r, \varphi)$  átváltásával ( $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $\text{tg } \varphi = y / x$ ).

Ideális Gauss-eloszlás esetében a **sugárnyaláb-teljesítmény** kifejezhető az intenzitás maximum értékével is (2. sz. egyenlet):

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy = \frac{\pi}{8} d^2 I_{\max} \quad (2.)$$

A sugárnyaláb jellemzése szempontjából kiemelt jelentőségű az ún. **sugárderék** ( $w$ ,  $d_0$ ), amely sugárnyaláb legkisebb keresztmetszetű sugara ( $w$ ) vagy átmérője ( $d_0$ ). Ezen a ponton a sugárintenzitás  $1/e^2$ -szeresére csökken. A sugárnyaláb  $d(z)$ -vel jelölt átmérőjét az előbbi  $i$  sugárderéktől mért távolság függvényében szokták megadni, ahol a  $z$  értéke jelöli a sugárderéktől vett távolságot. Ebből a jelölésből és kiindulásipont-választásból eredően a  $z = 0$  helyen a legkisebb a fókuszátlatlan sugárnyaláb sugara, illetve átmérője. A  $z = 0$ -tól eltérő ponton való mérés – akár pozitív, akár negatív irányba haladunk –, a **sugárnyaláb-átmérő** monoton növekedését mutatja, amelyet az alábbi 3. sz. egyenlet fejez ki:

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3.)$$

Az egyenletben a  $z_R$  érték az ún. Rayleigh-távolság. Ez az a távolság, ahol a sugárnyaláb átmérője a  $\sqrt{2} = 1,4142$ -szeresére nő, vagyis a keresztmetszete a sugárderék keresztmetszetéhez képest megkétszereződik. A Rayleigh-távolság a sugárzás hullámhosszágának függvénye, amely összefüggés az alábbi, 4. számú egyenlettel fejezhető ki:

$$z_R = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4\lambda} \quad (4.)$$

Amennyiben a sugárderéktől távoli térben ( $z \gg z_R$ ) vizsgáljuk a sugárnyaláb átmérőjét, illetve sugarát, akkor az már lineáris kapcsolatban áll a sugárderéktől vett távolsággal. Ezt a szögben kifejezhető széttartást hivatkozzák a **sugárnyaláb divergenciájaként** (5. sz. egyenlet):

$$\Theta = \frac{d_0}{z_R} = \frac{4\lambda}{\pi \cdot d_0} \quad (5.)$$

A divergencia – vagy más néven nyílásszög vonatkozásában megfigyelhető, hogy az a sugárderékkal inverz összefüggést mutat: minél kisebb a sugárderék ( $d_0$ ), annál nagyobb a nyílásszög, a divergencia. Ugyanakkor minél nagyobb a sugárnyaláb átmérője, a Gauss-nyaláb ugyanazon lencsével annál kisebbre fókuszálható

Amennyiben a Gauss-nyaláb szférikus lencséken keresztül halad át vagy tükrökről verődik vissza, mindig és mindenütt Gauss-eloszlású marad amellet, hogy viszont a sugárnyalábot

egyértelműen meghatározó paraméterei – divergencia ( $\Theta$ ) és sugárderék ( $d_0$ ) – megváltoznak. A lencsén való áthaladás a sugárderék méretének és helyének ( $z = 0$ ) megváltozását eredményezi.

A sugárminőség jellemzésére gyakran használják a **sugárparaméter-szorzat** értékét, amelynek széles körben elterjedt jelölése **BPP** („Beam Parameter Product”) és számítása a divergencia és a sugárderék-átmérő alapján az alábbi, 6. sz. egyenlet szerint történik:

$$BPP = \frac{d_0 \cdot \Theta}{4} \quad (6.)$$

A  $TEM_{00}$  alapmodus esetében – tehát Gauss-eloszlás esetén – a BPP értéke:

$$\frac{d_0 \cdot \Theta}{4} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (7.)$$

Amennyiben a sugárforrás eltér az ideálistól, akkor annak következtében a divergencia, illetve a sugárderék-átmérő egy **M faktornak** nevezett értékkel eltér a  $TEM_{00}$  modus ideális értékétől:

$$\frac{d_0 \cdot \Theta}{4} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (8.)$$

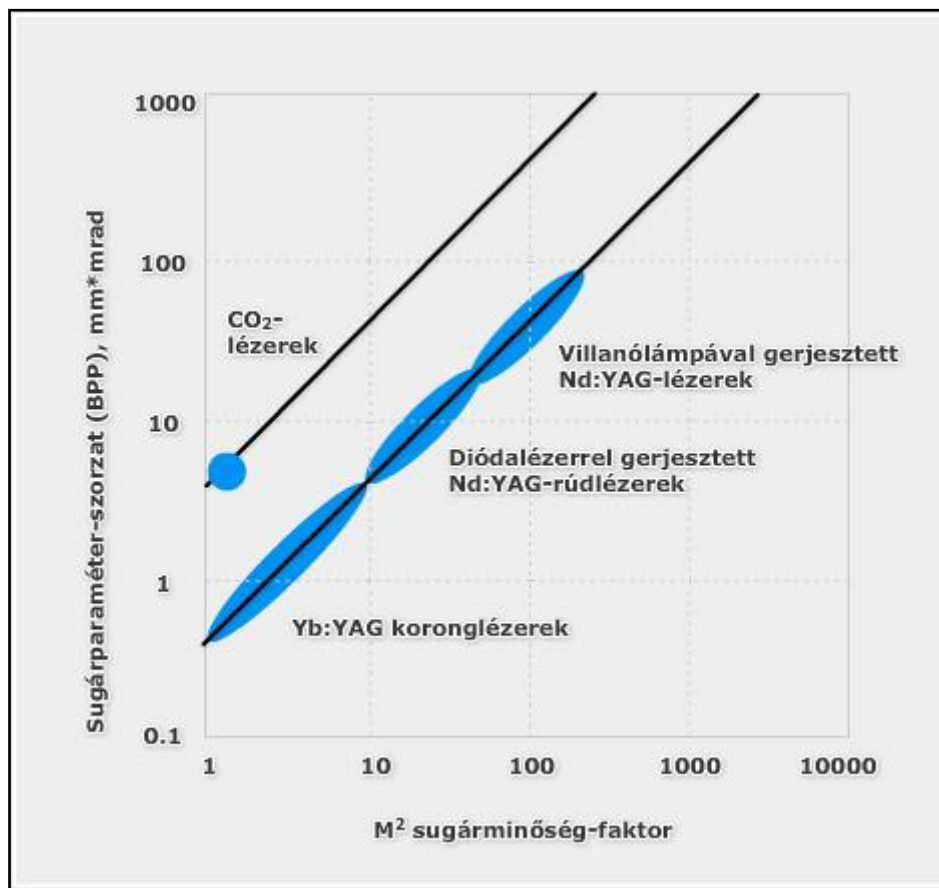
Az  $M^2$  még nem rendelkezik széleskörűen elfogadott magyar elnevezéssel. Az angol elnevezése Beam Propagation Factor, amely – a sugárnyaláb ideálistól való eltérésének megragadásán keresztül – lehetőséget ad arra, hogy belőle kiindulva egyetlen mutatóban, képletesen kifejezzük a **lézersugár minőségének mértékét** (jelölése: **K**). A **K** az alábbi képlet alapján adódik:

$$K = \frac{1}{M^2} \quad (9.)$$

Ideális esetben a **K** – és ennek megfelelően az  $M^2$  értéke is – 1-gyel egyenlő. Minél kisebb a **K**, annál jobban eltér a lézersugár minősége az ideálistól.

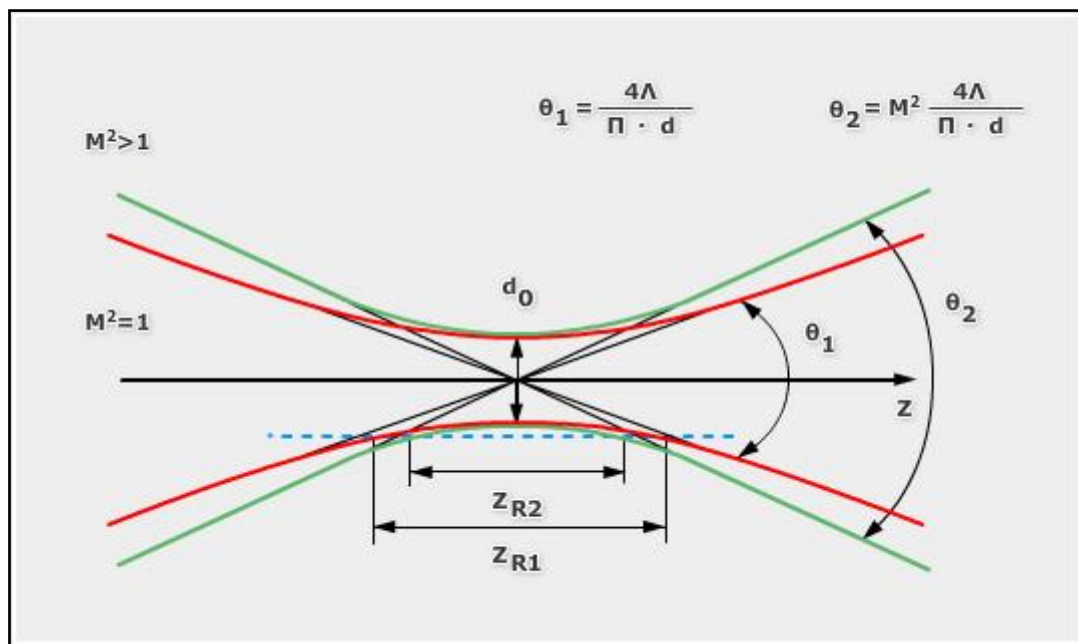
A sugárparaméter-szorzat és az  $M^2$  érték (a **K** inverze) közötti kapcsolatot szemlélteti az alábbi, 1. sz. ábra. Az ábrán szereplő, sugárforrásokra jellemző adatokat csak fenntartással szabad értékelni, mivel az azokat tartalmazó publikációk könnyen valamely, sugárforrás

gyártásával foglalkozó cég környezetéből kerülnek ki. Ezek sokszor olyan jellegű, „gyári” adatok amelyek csak speciális körülmények között érvényesek.



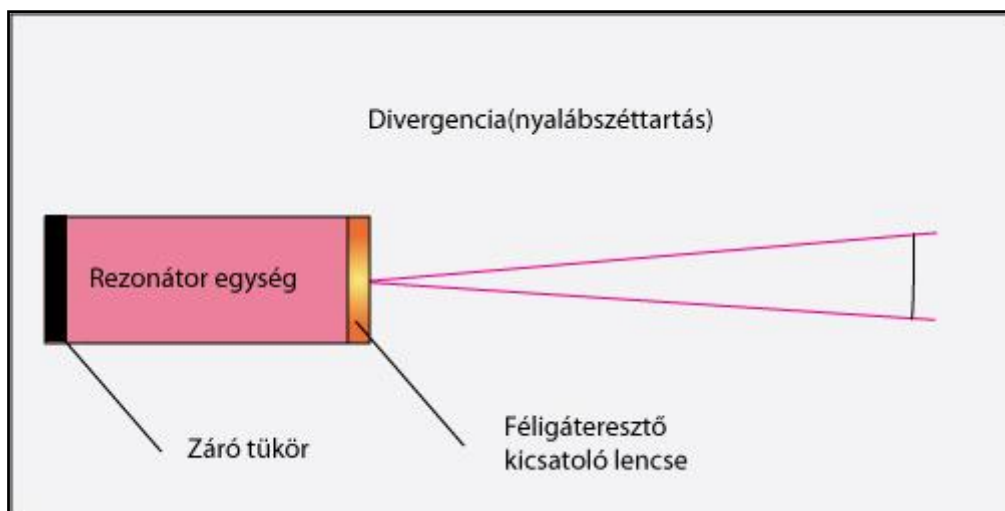
1. ábra Sugárnyaláb-teljesítmény [A1]

A lenti, 2. sz. ábra a sugárderék környezetében mutatja a sugárnyaláb geometriájának alakulását. Az ábra két sugárnyalábot ábrázol (zöld és piros), amelyek azonos átmérőjű sugárderékkel, de – az eltérő  $K$ , illetve  $M^2$  érték miatt – eltérő divergenciával rendelkeznek. Amennyiben ezt a két nyalábot azonos lencsével fókuszáljuk, akkor a nagyobb  $M^2$  értékű nyaláb nagyobb, a kisebb  $M^2$  értékű pedig kisebb fókuszfoltot fog eredményezni, tehát a sugárnyaláb  $M^2$  (illetve  $K$ ) értéke a fókuszálhatóságot is egyértelműen meghatározza.



2. ábra  
Sugárminőséget jellemző matematikai összefüggések [A2]

### 3.3. Divergencia



3. ábra  
Divergencia, nyalábszéttartás

Az előző 3.2 alfejezetben említett divergencia – vagy nyalábszéttartás – a legfontosabb és minden esetben kompenzálásra szoruló tulajdonság egy lézerrezonátor által kibocsátott lézernyalábnál. A divergenciát minden gyártó megpróbálja kollimátor lencsével vagy nyalábexpander segítségével lecsökkenteni – az ehhez szükséges elemeket a lehető legközelebbi egységként a rezonátorhoz beszerelve. A lézersugár minél kisebb átmérőn

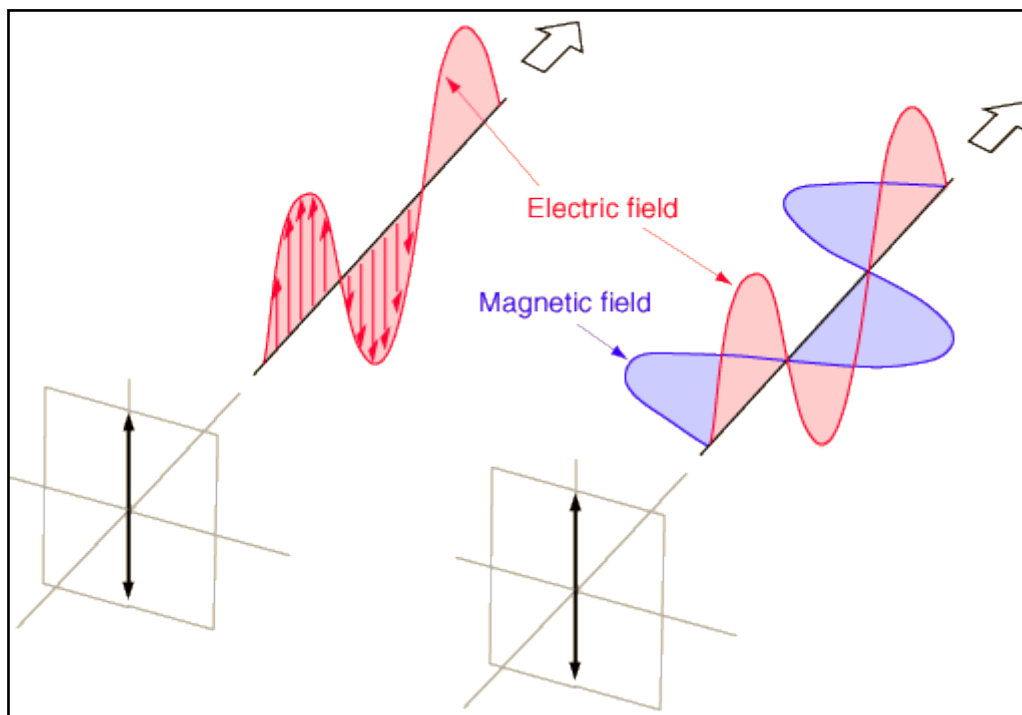
tartása a divergencia értékének növekedésével jár, emiatt szükséges nagyobb átmérőn sugárvezetni a tengelyeken és a vágás előtt a gyűjtő lencsével összpontosítani a vágandó anyag felületébe. A divergencia mértéke visszajelzésként is szolgálhat, hiszen az elhasználdott kicsatoló lencse romló tulajdonságai miatt megnövekszik.

### 3.3. Polarizáció

A polarizáció, mint fénytulajdonság lényege, hogy a hullámok mágneses terének iránya mindig állandó. A kilépő nyalábnak a szén-dioxid lézereknél minden esetben polarizálnak kell lennie, de a tulajdonságait mégis kompenzálnunk kell. Ez főleg a nagyteljesítményű vágóberendezéseknél okoz problémát, mivel a lineáris polarizáció miatt a vágásminőség nem megfelelő, emiatt a lézervezetés közben a tulajdonságait egy segéd lencsepárral megváltoztatják és a lineárisan polarizált fényt cirkulárisan polarizálttá alakítják, ami sokkal jobb vágási felületeket biztosít.

A lineárisan polarizált fény fajtái:

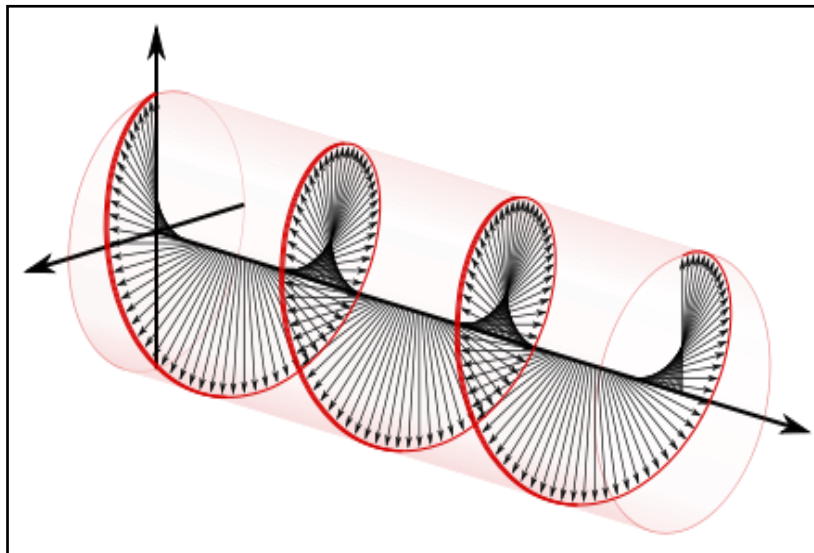
- horizontális (mágneses térerősség)
- vertikális (elektromos térerősség)



4. ábra  
Lineárisan polarizált fénynyaláb [A3]

Cirkulárisan polarizált fény fajtái:

- jobbsodrású
- balsodrású



**5. ábra**  
**Cirkulárisan polarizált fénynyaláb [A4]**

Két, egymástól negyed hullámhosszyira eltolt síkhullám összege ún. cirkuláris (forgó) polarizációhoz vezet, amely lehet jobbra és balra forgó (jobbsodrású, ill. balsodrású). A jobbra forgó polarizáció jelölésére az RHCP vagy röviden R, a balra forgó jelölésére az LHCP ill. röviden L szolgál. Ez a tulajdonság nagy teljesítményű lézeres vágóberendezések esetében rendkívül fontos a jó minőségű vágás eléréséhez.

## 4. A lézerrezonátorok általános felépítése és főbb ipari típusai

### 4.1. A rezonátoregység és működésének alapjai [1]

A lézerrezonátorok működésének lényegi fizikai háttere – visszautalva a 2. fejezetben már kifejtettekre – a következőképpen foglalható össze.

Amennyiben egy átlátszó anyagi közegben olyan atomok vagy molekulák találhatók, amelyek két energiaszintje közötti energiadifferencia pontosan megfelel egy olyan foton energiájának, amit a kisebb energiájú állapot képes elnyelni, a nagyobb energiájú pedig kibocsátani, akkor egy ilyen foton indukálja a nagyobb energiájú állapot átmenetét a kisebb energiájú állapotba, és ennek során az indukáló fotonnal hullámhosszát, irányát és fázisát tekintve azonos tulajdonságú foton kibocsátására kerül sor.

Ugyanakkor a kibocsátott fotont azonban a kisebb energiájú állapotban lévő atom vagy molekula el is nyelheti. A lézer akkor képes működni, ha a fénykibocsátó nagyobb energiájú állapot betöltöttsége nagyobb meghaladja a fényelnyelő, kisebb energiájú állapotét. A hullámhossztartományt, amelyben a fénykibocsátás mértéke meghaladja a fényelnyelést, a lézer **erősítési sávjának** nevezzük. Az erősítési sávon kívüli hullámhosszakon a lézer veszteséges.

A fényerősítési határfok jelentősen javítható, ha egy foton többször is áthaladhat az erősítő közegen, mivel minden egyes áthaladása során lehetőség nyílik arra, hogy újabb fénykibocsátást váltson ki. Az erősítők leírására vonatkozó szaknyelvben használt terminológia szerint ezt **visszacsatolásnak** nevezzük.

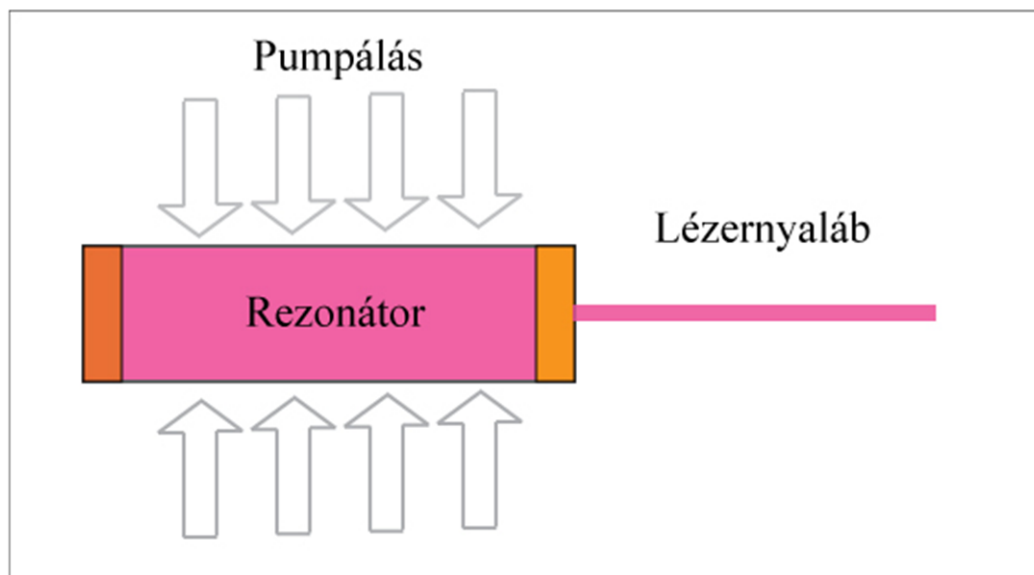
Előbbiek miatt a lézer fontos alkotóegysége az ún. **rezonátorüreg (vagy rezonátorcső)**, amelyet a két végén elhelyezett tükrök határolnak, amely tükröket úgy kell beállítani, hogy a közöttük fellépő interferencia az erősítési sávba tartozó, megfelelő hullámhosszra nézve **erősítő (konstruktív) interferencia** legyen.

Az erősítő közegnek biztosítania kell azt, hogy a lézerműködést lehetővé tevő energiaszintek közül a magasabb energiaszint betöltöttsége meghaladja az alacsonyabb szintét. A molekuláris energiaszintek betöltöttsége ugyanakkor Boltzmann eloszlást követ és az energia növekedésével exponenciálisan csökken az energiaszintek betöltöttsége. A lézerműködéshez ennek a betöltöttségnek a megfordítására: a 2. fejezetben már említett populáció-inverzióra van szükség. A populáció-inverzió elérését, illetve fenntartását a magasabb energiaszintre történő **pumpálással** oldják meg, amelyet különböző módszerekkel lehet megvalósítani.

A lézermédium gerjesztésére (a populáció-inverzióhoz szükséges, pumpáló energia biztosítására) használhatóak például:

- villanólámpák,
- lézerdiódák,
- elektromos kisülések,
- magnetronok.

A teljesítményfokozás érdekében a csövek végein két tükröt helyeznek el, amelyeknek köszönhetően a fotonok oda-vissza verődnek és a légtérben található többi atom gerjesztésével erősítik a lézersugár energiáját.



**6. ábra**  
Lézer gerjesztésének, pumpálásának sematikus vázlata

Ha pumpálással fenntartjuk a populáció-inverziót a rezonátorüregben, akkor a magasabb energiaszintű állapotok véletlenszerűen (spontán) is bocsátanak ki fotonokat (spontán emisszió). Ezek a fotonok további fotonok kisugárzását indukálják, és amennyiben ezeknek az iránya olyan, hogy a rezonátorüreg tükrői között oda- és visszaverődnek, akkor a rezonátorüregben való minden egyes áthaladás során újabb fotonok kisugárzását indukálhatják, amelyek velük megegyező hullámhosszúak, irányúak és fázisúak.

Ha a pumpálás folyamatos, akkor koherens fotonok formájában egyre több energia koncentrálódik a rezonátorüregben, amely oly módon „csapolható meg”, ha a rezonátorüreg

egyik végén lévő tükör részben áteresztő. Ebben az esetben a fotonok bizonyos része folyamatosan kiléphet a rezonátorüregből és ezt a kilépő, párhuzamos, monokromatikus, koherens sugárzást nevezzük **lézersugárzásnak**.

#### 4.2. Az ipari lézerrezonátorok főbb fajtái

A rezonátorokat sokféleképpen csoportosíthatjuk, viszont a lézertechnológia sokszínűsége és sokoldalú alkalmazhatósága következtében a paletta rendkívül széles, így minden egyes rezonátorfajtára nem térnek ki, hanem csak a jelenlegi piaci környezetben legelterjedtebb ipari, nagy teljesítményt kívánó technológiákhoz szükséges lézerrezonátorokról tesztek említést. A gyakorlatban elterjedtebb lézertípusok feltérképezése során a munkám során szerzett gyakorlati tapasztalatokra és a hazai piacot leginkább meghatározó, nagy lézergyártók közül a német Trumpf, a japán Amada, a szintén japán MAZAK, a svájci Bystronic és a belga LVD által az internetes felületeiken közzétett információkra támaszkodtam.

Alapvetően kétféle, igen elterjedt rezonátortípus határozza meg a piacot:

- **a gázlézerek és**
- **a szilárdtest-lézerek.**

Mindkét lézertípusnak a legnagyobb erénye a jó sugárminőség és a nagyobb lézerteljesítményt megkövetelő vágási, hegesztési eljárásokhoz szükséges teljesítmény és energiasűrűség.

##### 4.2.1 A gázlézerek

A gázlézerek esetében gázhalmazállapotú lézermédium gerjesztésével érjük el a lézernyaláb kicsatolását. A gázlézerek családja is széleskörű, viszont ipari felhasználásra a legelterjedtebbek a CO<sub>2</sub> lézerek, amelyek lézermínősége, vágáshoz szükséges egyéb tulajdonságai és univerzalitása a mai napig a legjobbnak tekinthető.

A CO<sub>2</sub> rezonátorok sokféle konstrukciója megfigyelhető, viszont alapelveikben nagyobb eltérés nem mutatkozik: a lézergázt gerjesztve, tükrök segítségével visszaverve erősítik, majd a már felerősített lézersugár egy kicsatoló tükrön keresztül kerül kibocsátásra. Fontos fajtáik a vágástechnikában:

- lassúáramlású axiális rezonátorok,
- gyorsáramlású axiális rezonátorok,

- kereszt- és gyorsáramlású rezonátorok,
- diffúzióhűtéses rezonátorok.

A következő fejezetben bővebben kifejtem ezen rezonátorok működési tulajdonságait, mivel az említett két legfontosabb alaptípus – a gázlézerek és a szilárdtest-lézerek – összehasonlítása választ ad arra, hogy a diplomaterv fókuszát és az általam tervezett rezonátort illetően miért éppen a CO<sub>2</sub> lézerre esett a választás.

#### 4.2.2 A szilárdtest-lézerek

A szilárdtest lézerek az utóbbi időben az ipar területén egyre nagyobb lehetőséget kaptak, a gépgyártók fejlesztéseivel méltó piaci ellenfelei lettek a CO<sub>2</sub> lézereknek. A lézermédium tekintetében jelentkező eltérésüket az adja, hogy gáz helyett szilárd halmazállapotú anyagok gerjesztésével érik el a lézer kicsatolódását. Fontos megjegyezni, hogy a kisteljesítményű félvezetőlézereket is a szilárdtest lézerekhez sorolják.

A YAG család terjedt el leginkább, amelynek legfontosabb fajtái:

- villanólámpával gerjesztett YAG lézer,
- lézerdiodával gerjesztett YAG lézer,
- YAG diszklézerek (hibrid).

A YAG a LASER-hez hasonlóan szintén egy mozaikszó: Yttrium-Aluminum-Garnet, amely a lézermédium összetételére utal. A lézerfényt fénypumpálás útján hozzák létre, és az erre a célra legjobb hatásfokra képes Nd:YAG (Neodymiummal szennyezett Yttrium-Aluminum-Garnet) lézermédiummal, lámpapumpált és diódapumpált kivitelben készítik. Villanólámpával pumpált kivitel esetében nagyobb lézerteljesítmény érhető el, viszont ennek a megoldásnak sokkal nagyobb a hűtésigénye, és egyenetlenebb minőségű lézernyalábot produkál. A diódapumpált lézerek kevesebb hőt termelnek és egyenletesebb nyalábminőséget biztosítanak.

A szilárdtest lézerek területén négyféle kialakítást figyelhetünk meg, melyeknél a fényminőségi értékek közel azonosak, viszont a hatásfokokban különbségeket láthatunk:

- fiber (szállézer),
- Nd: YAG,
- Nd:YVO<sub>4</sub> (vanadát),

- diszk.

A jelen diplomaterv szempontjából fontos és vizsgált vágástechnikai területen a két legelterjedtebb szilárdtest-lézer a diszk és a fiber. A diszk lézer a Trumpf cég szabadalma, mely elnevezést a korong alakú rezonátor miatt kapta. A termékpalettájukon szereplő 2D-s vágóberendezéseikben – amelyek TruFiber néven futnak – diszk lézerek biztosítják a lézerforrást, ami jól szemlélteti, hogy mekkora a hasonlóság a fiber és a diszk lézer között. A következő, a fiber (illetve diszk) és a CO<sub>2</sub> közötti döntés szempontjait bemutató fejezetben éppen ezért nem tennék különbséget a fiber és a diszk között, mivel azok nyalábtulajdonságai majdcsak teljesen megegyezők. A fiber és a diszk lézerek bővebb konstrukciós ismertetésébe diplomatervem terjedelmi korlátai miatt nem bocsátkozom, viszont gyakorlati jelentőségük miatt fontosnak tartom összehasonlítani őket a széndioxid lézerekkel, hogy kifejtthessem, miért választottam éppen egy CO<sub>2</sub> rezonátor részletesebb bemutatását és elvi mechanikai tervezését.

#### 4.2.3. Fiber vagy CO<sub>2</sub> lézer?

A hazai piaci-gazdasági feltételek mellett a vállalkozásoknak nagy fejtörést okozhat a megfelelő ár/érték-arányú lézervágó berendezés kiválasztása. Nagyon sok vállalkozás vásárol úgy lézervágó berendezést, hogy a mögötte megbúvó technológiáról, lézerminőségről, karbantartási költségekről és gazdaságosságról nem talál megfelelő iránymutatást és sok esetben a bonyolult műszaki leírások sem sokat segítenek a helyes döntés meghozatalában.

A mai vágástechnikai szegmensben a lézerezonátorokat tekintve két rezonátorfajta verseng a nagyobb piaci részesedésért: az egyik a gyorsáramlású CO<sub>2</sub> lézerek, a másik pedig a fiber lézerek csoportja. A fiber lézereknél tapasztalt dinamikus fejlődésnek elméletileg azt kellene mutatnia, hogy a CO<sub>2</sub> lézerek háttérbe szorulnak, de a gyártók – nem hiába – a mai napig a palettájukon tartják a gázlézereiket, hiszen jó vágásminőségük és sokkal kedvezőbb áruk miatt még mindig jobban megtérülnek olyan vállalkozásoknál, ahol nem csak vágástechnikára specifikálódott a termelés vagy pedig vastagabb lemezek megmunkálása adja a belső munkáik vagy bérvágási tevékenységük gerincét.

A vágássebességi értékeket figyelembe véve a fiber lézerek verhetetlenek a vékony lemezek (0,5-4 mm) területén. Azonban ha a vastagabb anyagok vágása nagyon fontos terület egy vállalkozás számára, akkor a CO<sub>2</sub> lézer nagyobb termelékenységét eredményez, amelynek oka a lézersugár fizikai tulajdonságaiban keresendő. A két, különböző típusú berendezés energiasűrűsége nagyban eltérő, hiszen a CO<sub>2</sub> lézer a kicsatolás után – megvezetve a

vágófejben és ott a fókuszáló lencsén keresztül – nagyobb átmérőjű lézersugarat képez, mint a fiber üvegszálon kicsatolt lézersugara. A nagy energiasűrűség a vágás sebességét nagyban befolyásolja: minél nagyobb az energia, annál gyorsabban vághat a berendezés, viszont ezen fizikai tulajdonság mellé más fizikai jelenségek is társulnak. Ilyen fizikai tulajdonság a hullámhossz, mely CO<sub>2</sub> lézernél 10.6 μm, a fiber lézernél pedig 1 μm. Nagyobb hullámhosszon a CO<sub>2</sub> lézer kisebb abszorpció mellett nagyobb hevítést tesz lehetővé az anyagban, ami nemcsak a vastag anyag vágása közben előnyös, hanem a vágandó lemezanyag átlukasztásának (piercing) ideje is lerövidül, mivel gyorsabban bekövetkezik az anyag áthevítődése.

Gazdaságosság tekintetében a fiber dominál, mivel az általánosan elterjedt rendszer a pumpáláshoz diódákat használ és nincs szükség méregdrága egységekre a rezonátorban és a sugárvezetéshez szükséges optikákra, amelyek a termelés folyamán kopóalkatrésznek számítanak. Fontos leszögezni, hogy a fiber lézerek általános szervízköltségei a gépgyártók szerint sokkal alacsonyabbak, mint a CO<sub>2</sub> rezonátorok esetében, viszont ha nem kopóalkatrész-hibáról van szó, akkor az alkatrészek a fiber lézer esetében nagyságrendekkel drágábbak. Energiaigényt tekintve 25-30%-kal optimálisabb fogyasztás érhető el a fiber lézerekkel. Fontos különbség, hogy a fiber lézerek csak vágógázok alkalmazását kívánják meg, mivel a lézermédium jellegéből eredően nem kellenek rezonátorgázok az üzemeltetéshez.

Ha a gazdaságosságot nagyon fontos szempontnak tekintjük, akkor természetesen ki kell térnünk a gép beszerzési árára is. A fiber lézerek árai a mai napig sokkal magasabbak, mint az ugyanolyan teljesítményszintet nyújtó CO<sub>2</sub> lézereké, ami – főleg kisebb költségvetésű cégeknél – nagyon fontos szempont. A gépgyártók a piaci verseny nyomása alatt megpróbálnak minél jobb áron eladni fiber lézer berendezéseket is, de a mai napig érzékelhető ez a jelentős árkülönbség.

A Lézer üzemeltetésének szigorú munkavédelmi biztosítása sokkal kritikusabb fiber lézerek esetében, hiszen a hullámhossz miatt a vágás során elreflektált fénysugarak a retinában egészségügyi problémákat okozhatnak. Emiatt előfordul, hogy a berendezés lesötétített (zöldes színű) üveg mögött vág, aminek nagy hátránya gyakorlati vágástechnikai szempontból, hogy a folyamatokba való betekintés lehetősége nagyban leszűkül, és egy esetleg rosszul programozott sávtervnel a késői beavatkozás miatt a vágófej és annak mechanikai elemei a tervezettnél sokkal hamarabb leamortizálódhatnak.

Tervezésem alapjának a CO<sub>2</sub> lézer rezonátorának bemutatását választottam, mivel véleményem szerint még mindig sokkal univerzálisabb megoldás egy hazai vállalkozás számára egy ilyen berendezés, mint egy sokkal drágább fiber megvásárlása. Fontos azonban megjegyezni, hogy azon cégek esetében, amelyek csak vágástechnikával foglalkoznak és csak vékony lemezekre specializálódtak, ez a feltevésem nem feltétlenül állja meg a helyét.

Úgy vélem, ha az univerzális jelleg a legfőbb szempont, illetve hogy lemezvastagságot tekintve teljesen átfogó megoldással szolgáljon egy lézerforrás, akkor a mai napig jobb megoldás lehet egy CO<sub>2</sub> rendszer, főleg ha olyan vállalkozásról beszélünk, ahol az első lézervágó berendezést állítják munkába. Igen fontos különbség vastagabb lemezek vágása esetén, hogy a hatékony vágási sebesség, a megfelelő felületminőség és a sorjamentesség – jó beállítások mellett – egy CO<sub>2</sub> lézerrel könnyen elérhető akár 25 mm-es lemezvastagságnál is, míg a fiber lézerek a nagyobb lemezvastagságnál a rosszabb abszorpciós mutatóik miatt sorját, illetve sok esetben rosszabb felületminőséget produkálnak.

A fiber lézerek megjelenése és erőteljesebb térnyerése csak néhány évre nyúlik vissza, ezért az még nem teljesen kiforrott technológiának minősül, amely azonban hamarosan – főként a diszk lézerek elterjedésével – sokkal jobb vágási minőséget fog biztosítani, és komplexebb munkák – például a robotok segítségével történő hegesztési és vágási eljárások – esetében piacvezetővé válhat. A két technológia előnyeit az alábbi táblázatban foglaltam össze:

<b>A fiber lézerek előnyei</b>	<b>A CO<sub>2</sub> lézerek előnyei</b>
Egyszerű sugárvezetés, nem kíván optikai rendszereket	Nagyobb vágási sebességek vastagabb anyagok esetében
Kiváló minőség 4 mm-es lemezvastagságig	0,5-25 mm-es lemezvastagság-tartományban tökéletes vágási minőség, jó beállítások mellett sorjamentesség
Gyorsaság a vékony lemezeknél	univerzalitás, minden anyagvastagságnál jól használható
A fajlagos költségek alacsonyak (6 mm lemezvastagság alatt)	A fajlagos költségek alacsonyak (6 mm anyagvastagság felett)
Nagyobb energiasűrűség a kisebb sugárátmerő miatt	Munkavédelmileg biztonságosabb, mint a fiber
A lézernyaláb irányítása száloptikán történik	A Lézernyaláb energiasűrűsége kisebb, viszont a hullámhossz-tulajdonságai előnyösebbek

## 5. CO<sub>2</sub> lézerezonátorok általános felépítése és típusai

### 5.1. A rezonátor általános felépítése

A 4.1-es fejezetben áttekintést adtam a rezonátorok általános felépítésére vonatkozóan. A CO<sub>2</sub> lézerekre is érvényesek az alapelvek, miszerint egy adott lézermédiumot térben, két tükör között, adott gerjesztési eljárással gerjesztünk, majd az oszcillált fotonokat adott erősítés után kicsatoljuk.

A következő alfejezetekben a rezonátor általános elemeit és a tulajdonságait mutatom be.

### 5.2. A rezonátorüreg és a lézermédium [5][6]

A rezonátor üreg – amely ipari berendezéseknél alapvetően csőforma – rengeteget fejlődött kialakításában a régebbi berendezésekhez képest, mivel a lézerteljesítmény egyenes arányban növekedett a csőhosszakkal, ami a helyigényt is nagyban befolyásolta. A gyártóknak alkalmazkodniuk kellett a helyigény racionalizálására vonatkozó igényekhez, ezért a csőhosszakat megtörve és több sávon kezdték kialakítani a gerjesztést. Ezen konstrukciók hátulütője a sokkal nagyobb komplexitás és ezzel összefüggésben a nehezebb összeszerelés és beállítás, amely szükségszerűen ezen berendezések árában is megmutatkozik. Hasonlóképpen az anyagminőségi kritériumok is megváltoztak.

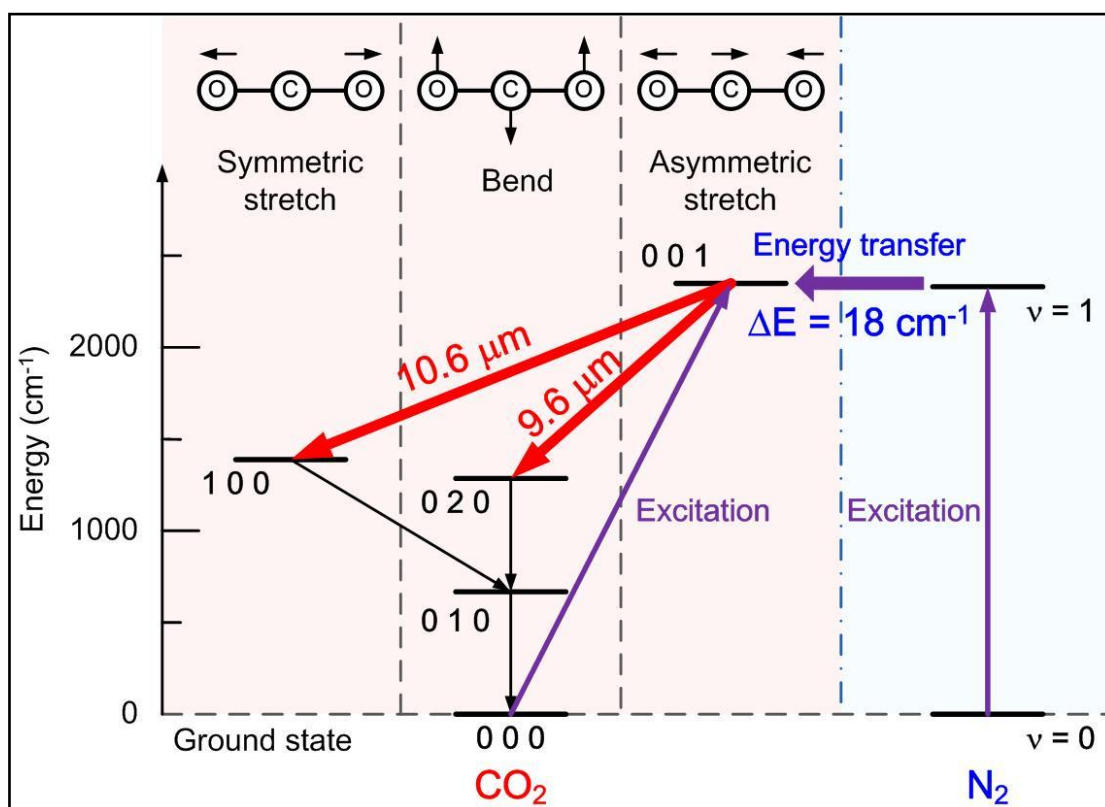
A rezonátorcsövek jellemző anyaga bórszilikát üveg, amelynek legfontosabb tulajdonsága, hogy teljesen visszaveri még a nagyteljesítményű egységekben is a gerjesztés alatt kicsatolt fotonokat. Könnyen hűthető és kiváló hőálló tulajdonságokkal rendelkezik. A rezonátorcső hossza nagymértékben befolyásolja a kicsatolt lézersugár teljesítményét, hiszen a pumpáló energiát felvevő lézermédium térfogata meghatározó a teljesítmény szempontjából. A csőhosszak és lézermédium-mennyiségének változtatásával minden gyártó a mai napig kísérletezik az ideálisabb gerjesztés érdekében.

A gázközeg gázzal való telítése előtt a szivattyú vákuumot képez, hogy semmi mással ne tudjon keveredni a médium, amely hátrányosan befolyásolhatná a kicsatolt lézer nyalábminőségét. A gázok minőségét és a keverékek arányát a lézervágó berendezés szeleprendszereken keresztül adagolja a kívánt százalékarányban. A gázokat a mostani gyártók nagy tisztaságban képesek szállítani, így a palackokban lévő gázok szennyezőanyag-tartalma minimális. A lézermédium három különböző komponens keveréke:

- nitrogén,

- hélium,
- szén-dioxid.

Az elektromos kisüléssel gerjesztett nitrogéngáz molekuláitól ütközéseken keresztül veszi át a széndioxid aszimmetrikus vegyértékrezgése az energiát. A többi rezgés energiaszintjei nem népesednek be az ütközések során ezekre irányul az átmenet az indukált emisszió során. Ezen tulajdonságok miatt a CO<sub>2</sub> molekula három energiaszinten, három különböző formát képes felvenni és változtatni.



7. ábra  
Lézer médium energiaszintjei és a hozzátartozó deformációk [1.5.]

A egyes átmeneten a CO<sub>2</sub> molekula szimmetrikusan nyúlik, kettes energiaszinten elhajlik, a legmagasabb hármas energiaszinten, pedig aszimmetrikusan eltorzul. Minden átmenet a molekula rezgésével és energiájának megváltozásával jár. Az indukált emisszió következtével nagyon rövid ideig képesek egy átmenetet, energiaszintet megtartani. Aszimmetrikus torzulás hatására már folyamatos a foton kibocsátás és ezt az átmenetet tartják a legrövidebb ideig. A kettes átmenetre visszaesve, még képesek tartani az adott energiaszintet, amit megpróbálunk újból aszimmetrikus torzulásra bírni, hogy újragerjesztődjön és folyamatos legyen a populáció inverzió. A kettes szinten minél rövidebb ideig tartjuk meg az atomokat, molekulákat, annál

gyorsabban vagyunk képesek újra gerjesztett állapotba visszaküldeni azokat. A két segédgáz (nitrogén, hélium) segítségével a folyamatokat könnyen fenntarthatja a rendszer és jó keverékarány mellett gyorsíthatja is az eljárást. A nitrogén segítségével ütköztetjük a CO<sub>2</sub> molekulákat és ezzel gerjesztődést alakítunk ki, a hélium pedig stabilizálja az energiaszinteket.

### 5.3. Optikai eszközök a rezonátorban

A rezonátorban elhelyezett tükrök szerepe a legfontosabb és ezek a legfinomabb beállítást igénylik szereléskor, mivel a pontos erősítés és lézerkicsatolás legmeghatározóbb elemei.

A piacon egyre több anyagminőséggel találkozhatunk, hiszen az optikákat gyártó cégek között hatalmas a verseny a minél jobb abszorpciós mutatóval rendelkező optikák iránt. A hőfejlődés és az abszorpció-értékek között lineáris a kapcsolat: minél nagyobb az abszorpciós érték, az optika annál több, a lézerfényben található fotont nyel el, amely a lencse vagy tükör túlzott felmelegedéséhez vezethet. Teljes áteresztés vagy visszaverés fizikailag lehetetlen, így mindig számolnunk kell hőfejlődéssel, ezért a rezonátoregységen belül minden elemet hűtéssel látnak el a tervezők. A rezonátoron belüli optikákat fajtánként változó anyagból gyártják.

A rezonátorcsőben található optikafajták:

- zárótükör,
- kicsatoló tükör,
- sugárterelő tükör.

#### 5.3.1. Zárótükör

A zárótükör segítségével verődik vissza a rezonátorüregben a lézersugár, amely így a féligáteresztő tükör és ezen zárótükör között erősödik.

A legfontosabb anyagjellemzői:

- anyaga: Ge, ZnSe, GaAs,
- Reflektálási mutató: 99,0%-99,7%.

Beépítésüket tekintve a zárótükrök mindig egy precízen állítható foglalatban kapnak helyet és hűtéssel látják el őket, hiszen az abszorpció miatt ezek is melegednek, és ezt a hőmérséklet-

növekedést minden esetben kompenzálni kell valamilyen hűtőközeggel. A gyártók különféle geometriai tulajdonságok szerint csoportosítják optikáikat.

### 5.3.2. Kicsatoló tükör

A zárótükör ellenpárja a kicsatoló tükör vagy más néven féligáteresztő tükör, melynek legfontosabb tulajdonsága, hogy adott erősítési szintnél a lézerefényt, az optika anyagi jellemzői miatt képes áteresztetni, így a lézerefény az erősítési szint elérése után kicsatolódik a rezonátorüregből. Ennek a lencsének a beállítása és jó megválasztása talán a legfontosabb tényező, hiszen a kibocsátott lézerefény tulajdonságát ez határozza meg. Rossz hűtés vagy rossz lencse esetén a lézerefény divergenciája és a többi tulajdonságának romlása nagyban befolyásolná a sugárvezetést és így a vágásminőséget is.

Legfontosabb anyagjellemzői:

- anyaga: ZnSe,
- áteresztőképessége: 10%-50%.

Az áteresztőképesség a rezonátorteljesítményhez igazodik: nagyobb erősítésnél egy magasabb százaléktértnél fogja áteresztetni a lencse a lézersugarat, mivel a teljes egységnek fel kell erősítenie a sugarat. Kis teljesítményű gépeknél – mint például gravírozó gépeknél – sincs szükség kis áteresztőképességre, mivel a rezonátoregység teljesítményében tartalékokat hagynak, és nem járattják maximumon a rezonátort.

### 5.3.3. Sugárterelő tükör

A sugárterelő tükrök fontossága a “hajtogatott” rezonátorcsőnél jönnek előtérbe, hiszen a záró és kicsatoló optikák között meg kell törni a lézerefény haladásának irányát, hogy képes legyen a sugár a két optika között oda-vissza verődni. Ezeket a lencsákat is minden esetben könnyen és precízen állíthatóra tervezik és hűtéssel látják el. Itt is abszorpció lép fel, mely ellen a tervezőknek olyan rendszert kell beiktatni, mely megvédi az elemet a meghibásodástól. Az anyagjellemzők és a reflektálási mutatók megegyeznek a zárótükrökével.

## 5.4. Általános kialakítások és fajták[8]

A lézervágó berendezések gazdaságos üzemeltetésére való törekvés nagyban megváltoztatta a gépek felépítését, a rezonátorok fejlesztésével változott a hatásfok- és energiaigény, amely jelentősen befolyásolta a termelékenységet és csökkentette a kiadásokat. Az általános rezonátorelemek mellé felsorakoztak újabb egységek, amelyek – azon kívül, hogy a

szervízelési igényeket is csökkentették –a teljes rendszert stabilabbá és sokkal kezelhetőbbé tették.

Ezen lézerrezonátor-fajták gépgyártónként változó kialakításban jelennek meg a vágástechnikai szegmensben alkalmazott lézervágó berendezésekben. a hazai értékesítésben vezető gyártók géppalettáin mindezen eszközök megtalálhatóak. Fontos leszögezni, hogy a teljesítményben és gazdaságosságban élenjáró és legelterjedtebb fajták mind gyorsáramlású berendezések. Képesek akár 15-20 kW kinyert lézerteljesítményre is, amellyel már nem csak a vágási tevékenységet, hanem a komolyabb hegesztési műveleteket is gazdaságosan kiszolgálják.

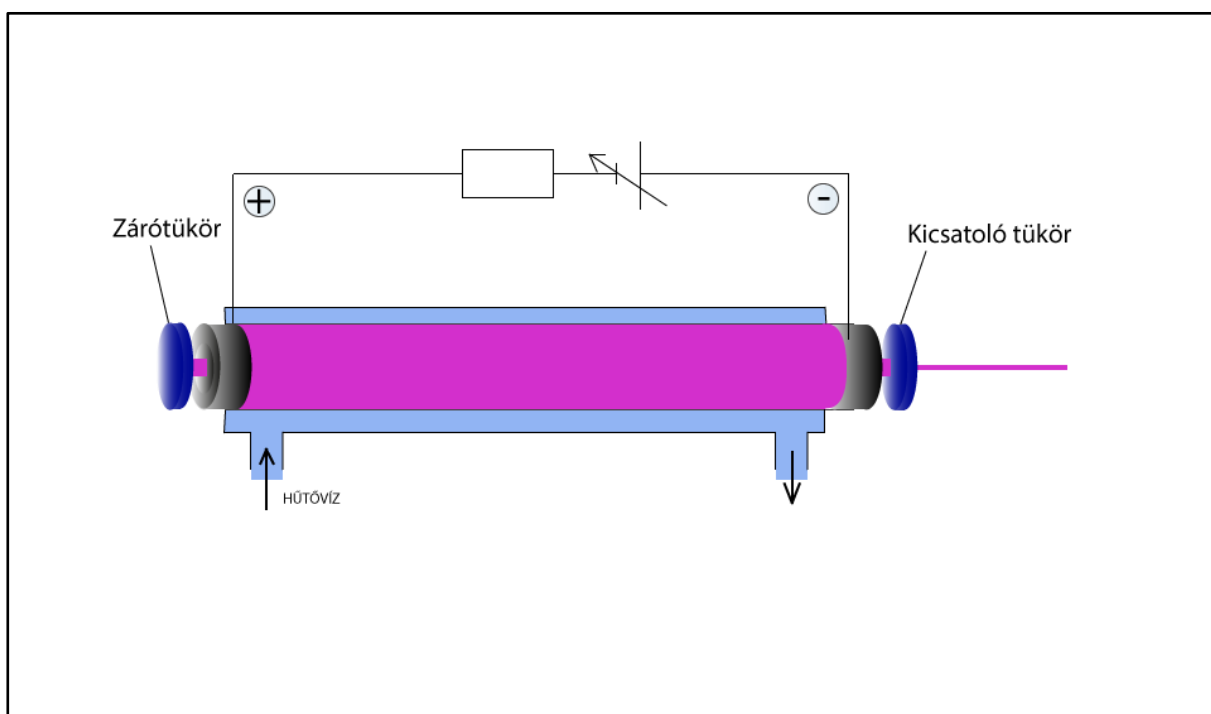
#### 5.4.1. Lassúáramlású axiális rezonátorok

Ezen lézerkonstrukciók a fejlesztések első lépcsőfokai, nagyon kevés helyen alkalmazzák már napjainkban, viszont kisebb vágási munkálatokra, akár jelölésre is könnyen használhatóak. A kicsatolt lézerteljesítmény jelentősen elmaradt a komolyabb gyorsáramú rendszerekéhez képest, viszont nagyon strapabíró és jó lézermínőséget biztosító rezonátorok.

Lassú áramlásukat egy vákuumpumpa beiktatásával érik el, melynek gázáramoltatási sebessége nem éri el az 50 m/s-ot. Minden esetben vízhűtéssel kell ellátni a rezonátorcsöveket és az optikákat, hiszen a lézermédium hőmérsékletét optimális értéken kell tartani ahhoz, hogy a populáció-inverzió létrejöjjön és a médium pumpálása folyamatos maradjon. A kritikus hőmérséklet felett a CO<sub>2</sub> atomjai már nem gerjesztődnek, a szén és az oxigén atomok közti távolságok és az egymáshoz viszonyított távolságok sem változnak, nem rezegnek, nem expandálódnak. Minél több mozgási energia veszítünk el a hőmérséklet emelkedésével, annál jobban romlik a hatásfok, majd egy bizonyos érték felett leáll a folyamat és megszűnik a kicsatolás.

A felépítése egyszerű és a szervízigénye is alacsony ennek a fajtának. Sok esetben problémát okozott a gyártóknak, hogy ha egyenáramú (DC) gerjesztést alkalmaztak, akkor a fém elektródák az elhasználódásuk során beszennyezték a médium gázelegyét és feltapadtak az optikákra. Ennek megoldására besüllyesztett üregekbe anód oldalon három-négy elektródával (szimmetrikus elosztva) és egy katód oldali gyűrűvel gerjesztik a rendszert, amelynek a csatlakozófalba való besüllyesztésével megoldották a szennyeződések túlzott bekeveredésének problémáját. A szerkezetet mindkét végén zárja egy-egy tükör, melyből az egyik zárótükör a másik pedig egy áteresztő tag, amely adott áteresztő tulajdonságának arányában engedi át az erősített fotonnyalábot. Fontos megjegyezni, hogy az optikák hűtése

ennél a rendszernél rendkívül fontos szerepet kap. Ha meghibásodnának ezen optikai tagok, a rendszer nem lenne képes gerjeszteni a médiumot, és az oda-vissza verődés és az ezáltal indukált emissziós folyamatok nem indulnának be, tehát Lézert nem nyerne ki a rendszer. Ezen lézerfajtát koaxiális lézerek is szokták nevezni, hiszen a gázáramlási irány a rezonátorcsőben, a gerjesztés iránya és a kicsatolt nyaláb iránya is egy tengelyre esik. itt kivételként jelenhet meg olyan megoldás, amelynél nagyfrekvenciás rádióhullámos gerjesztéssel teszik aktívvá a lézermédiumot, ebben az esetben a gerjesztés iránya merőleges a nyaláb kicsatolására és az áramlás irányára is.

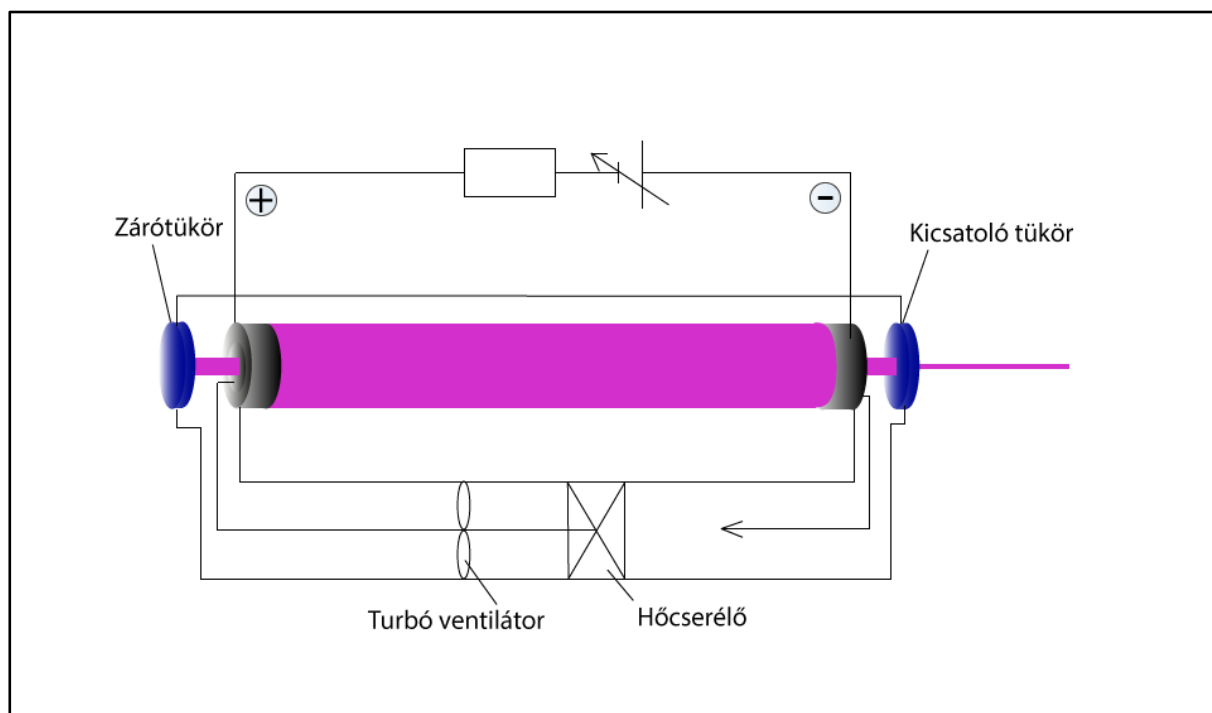


8. ábra  
Lassúáramlású DC gerjesztett rezonátor sematikus ábrája

#### 5.4.2. Gyorsáramlású axiális rezonátorok

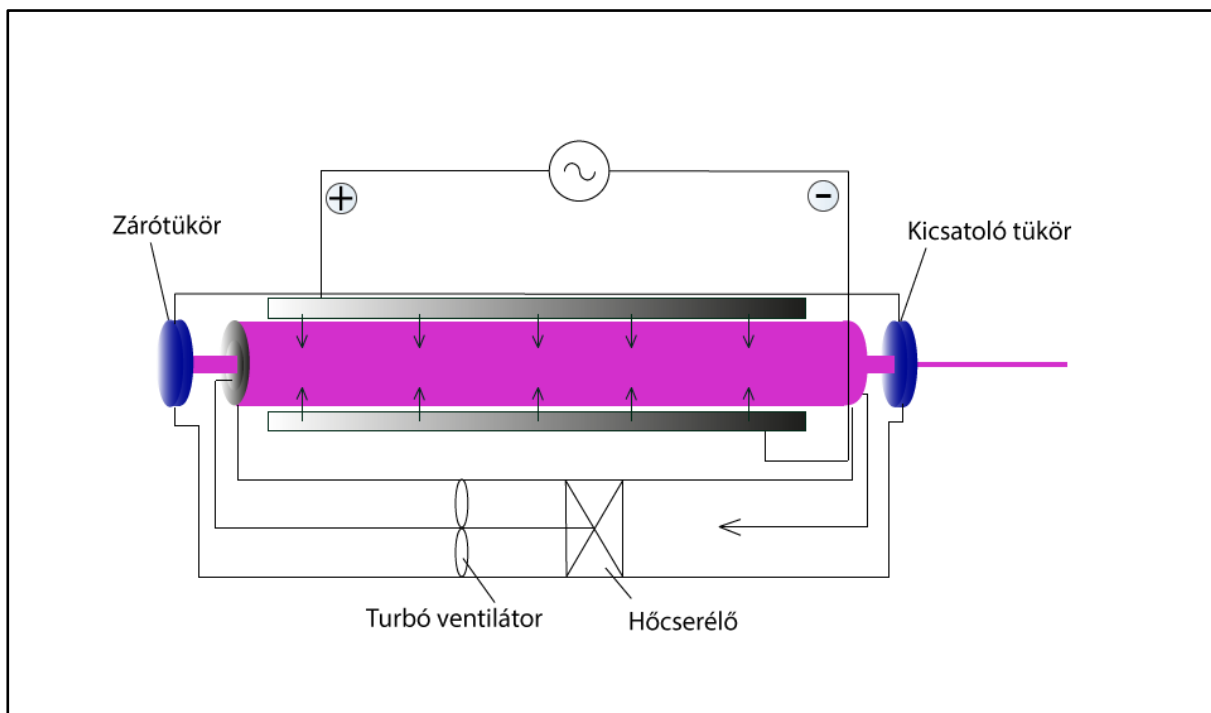
A 6. ábrán látható lassúáramú kialakítás modernebb változata, amely gyors áramlást tesz lehetővé, és sokkal hatásosabb és nagyobb teljesítmény kicsatolásra alkalmas. Itt a lézermédium áramoltatását mágneses csapágyazású turbóventillátor látja el, melynek segítségével akár az 300 m/s sebesség is elérhető. Minden gépgyártó az olajmentes radiális vagy axiális berendezéseket építi be a rezonátoraiba, melynek hatása nem csak a minőségben, de a gép beszerzési árában is arányosan megmutatkozik. A gázelegy a cirkulálás során hőcserélőkön keresztül érkezik vissza a szívóoldalra. Fontos tudni, hogy a hőmérséklet

emelkedését a nagyobb csőhosszak és a hőcserélők működésének és számának növelésével, optimális értéken tarthatjuk.



**9. ábra**  
Gyorsáramlású DC gerjesztésű lézerrezonátor egység sematikus ábrája

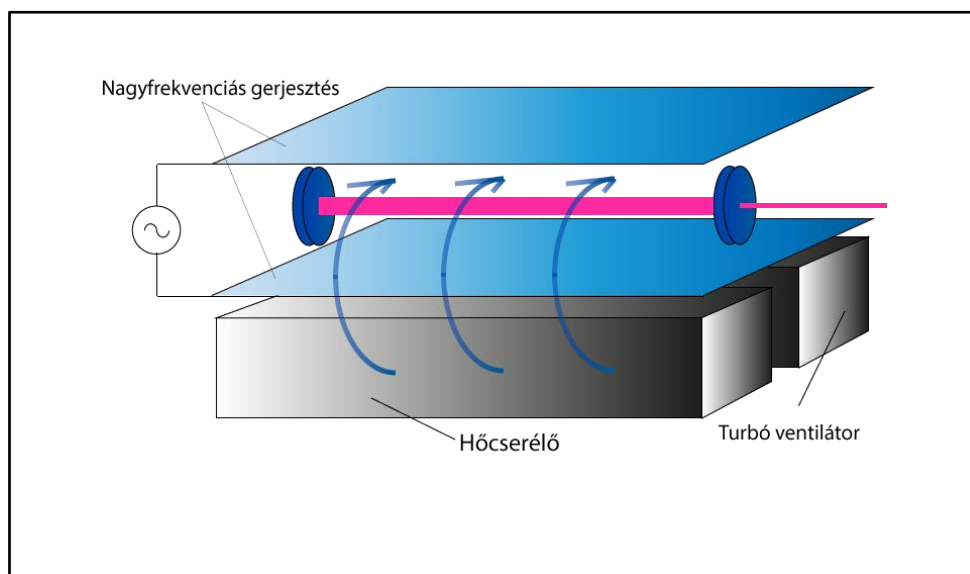
A kéttengelyű rezonátor kialakítása nagyon hasonló a 9. ábrán bemutatotthoz, a különbséget az alkalmazott gerjesztési megoldás adja, amely nem egyenáramú gerjesztés, hanem rádiófrekvenciás (mikrohullámú) gerjesztés. Nagy előnye a rendszernek, hogy a rezonátor kvarccsővében nincsenek elektródák, hanem kívülről gerjesztődik a lézermédium. Több kialakítást is megfigyeltem nagyobb presztízsű gyártóknál: van, aki két hasábot helyez el a rezonátorcsövön egymással szemben, de találtam olyan gyártót is, aki spirális oszcillátorral oldja meg a feladatot. Nagy hátránya a rádiófrekvenciás (RF) oszcillátornak, hogy nagyon drága eleme a rezonátornak, és a DC gerjesztésnél 10-20 %-kal gyengébb a hatásfoka, viszont nagyban kompenzálja ezen tulajdonságait azzal, hogy a médium terét nem szennyezi és emiatt hosszabb az élettartama és az ezzel járó szervizigényeket jelentősen leredukálja. A szóban forgó piaci szegmenset uralják ezek a berendezések és ez a rezonátorgerjesztési kialakítás.



10. ábra

Az RF gerjesztést a szakirodalom egy része a koaxiális lézerezonátorokhoz sorolja, azonban azt tapasztaltam, hogy sok helyen ezt a fajta berendezést inkább kéttengelyűnek kategorizálják, mivel az RF gerjesztés merőleges a sugár kicsatolásának irányára.

### 5.4.3 Kereszt- és gyorsáramlású rezonátor



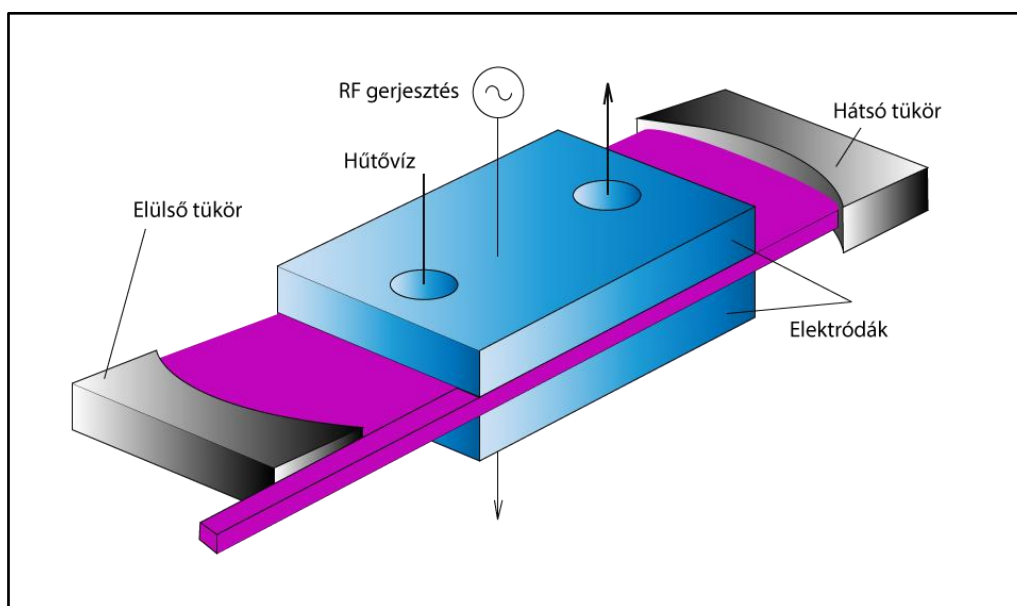
11. ábra

Kereszt- és gyorsáramlású rezonátor sematikus ábrája

A keresztáramlású rezonátor elvi, sematikus ábráján jól látható, hogy annyiban tér el az axiális kialakítástól, hogy az áramlás iránya vertikális, a nagyfrekvenciás gerjesztés pedig erre merőlegesen alakul ki. Az elektródák távolsága és a lézermédiumnak szánt tér itt nagyobb, és nyitott rendszerről beszélünk. Fontos megjegyezni, hogy RF nagyfrekvenciás gerjesztés ennél a kialakításnál sokkal magasabb frekvenciát is elérhet, mint az axiális lézercsöves kialakítás esetében. Nagyon nagy teljesítmények eléréséhez az áramoltatási sebességet növelik, hogy a gáz minél gyorsabban hűljön és a keletkező reakció hatásfokát csökkentő gázelegyek a frissítés során az optimális értékek alatt maradhassanak. A gázfogyasztás a teljesítmény nagyságával növekszik és a frissítés mértéke is könnyen optimalizálható. A turbóventillátorok a vákuumszivattyú leszívása után indulnak és járnak addig, amíg meg nem szakítják a populáció-inverziót. Az ipar területén erre a kialakításra az ára és túlzott szervizelési igénye miatt nagyon vastag anyagok vágására és komplex hegesztési feladatok elvégzésére szolgáló célgépként tekintünk. A gázreakciós lézerekhez hasonlóan ez nem tartozik a legelterjedtebb kialakítások közé.

#### 5.4.4. Diffúzióhűtéses lézerezonátor

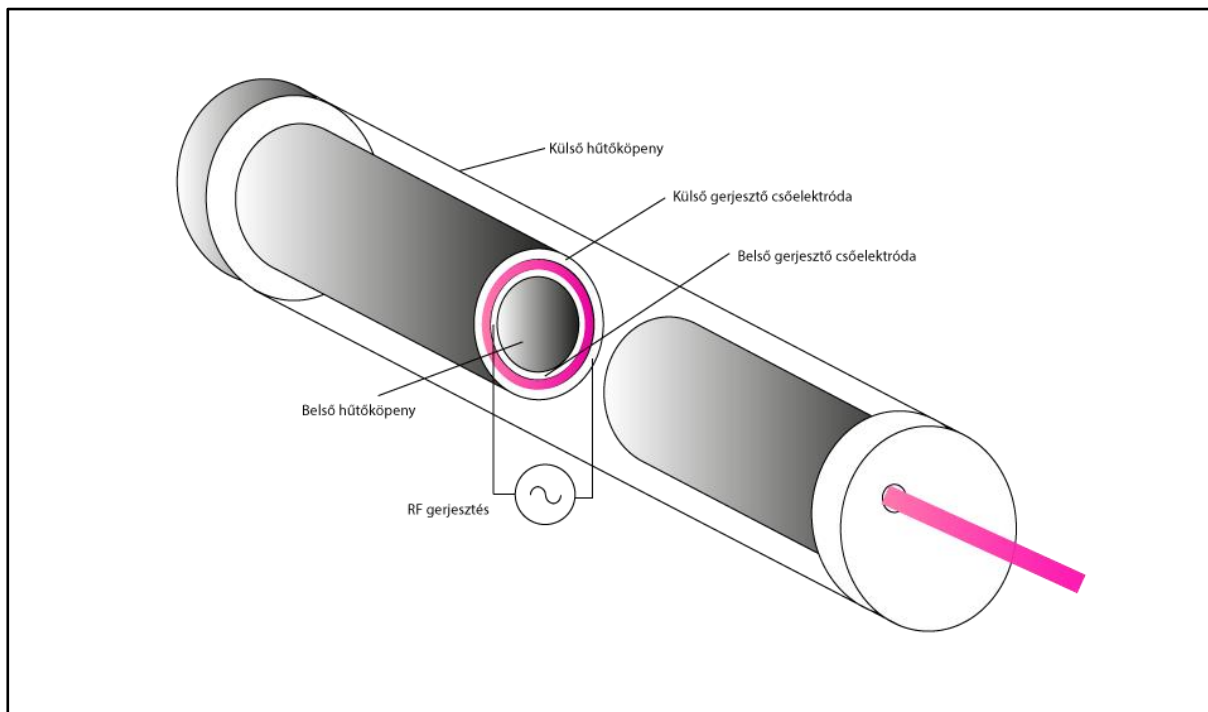
A diffúzióhűtésű lézerezonátor egy kompakt kivitelű lézerforrás, amelynél lapszerű, esetleg koaxiális elrendezésről beszélünk és rádiófrekvenciás gerjesztés segítségével gerjesztődik a lézermédium. Sematikus ábráján jól látható hogy az aktív fegyverzetet működés során folyamatos hűtéssel látják el.



12. ábra  
Diffúzióhűtésű lézerezonátor sematikus ábrája

Az ábrán jól látható, hogy két homorú tükörtag között verődik a lézersugár az erősítés folyamán, és a megfelelő tükröltés miatt az elülső tükörtest mellett kicsatolódik egy nyalábkialakító modulra, amely a lézerfény formálásában vesz részt. A fegyverzet aktivitásának megfelelő fenntartását és a komplett egység hűtését elősegítik még azzal, hogy a rezonátor külső burka öntöttvas elemből áll, amelynek nagy a hőfelvevő-képessége és megoldja annak elvezetését. Legfontosabb érv emellett a konstrukció mellett, hogy mérete optimális, és könnyen telepíthető az adott technológiához, legyen ez vágási munka, jelölés vagy akár finomhegesztés. Ezen berendezések jellemző kicsatolt teljesítménye – a gyártók katalógusaiból alapján – maximálisan 8 kW. Viszont a kereslet alakulása nem a maximális teljesítményigények kielégítésére való törekvést mutatja, hiszen ezen lézerforrások 8 kW-os maximális teljesítményének elérésében – a fenntartási költségeket és az energiafogyasztást tekintve – a gyorsáramlású lézerrezonátorok előnyösebbnek bizonyulnak.

Két kialakítást vizsgáltam meg ezen fajtaánál: az egyik egy – a Trumpf által fejlesztett – koaxiális RF diffúzióhűtésű lézeregység, a másik pedig egy – a ROFIN által fejlesztett – *slab* (lapszerű) lézerrezonátor, ami teljesen megegyezik a 12. ábrán látott kialakítással. A 13. ábrán jól láthatóak a kialakításbeli különbségek.



**13. ábra**  
**Koaxiális diffúzióhűtéses rezonátor (Trumpf)**

A 13. ábrán jól látható, hogy itt a lézermédium tere nem két téglalappal elszeparált egységben, hanem egy csőszerű médiumtérben van, Belül és kívül elszeparálva a vízhűtési csőelektrodáktól. A két elektróda nagyfrekvenciás gerjesztéssel indukált emissziót vált ki a lézermédiumból, amelyet a két csőszelvény végén lévő tükrök segítségével veretnek oda-vissza, majd a tükrön kialakított résen a gerjesztett lézernyaláb itt is egy nyalábformálóra csatolódik ki. Ennél a fajta rezonátortípusnál is látható, hogy mozgó alkatrész nincs a rendszerben.

A gázellátás annyiból érdekes ezeknél az eszközöknél, hogy csak egy palack kevert lézergázt használnak. A gyártók leírása szerint, ha három műszakos munkarendben, folyamatosan mennek a gépeik, akkor is 82 nap alatt fogy ki egy tartály. Emiatt ezen eszközök mellékideje kimondottan előnyösen alakul a gyorsáramlású lézerrezonátorokhoz képest.

## 5.5. Konstruktív elvek

A legfontosabb gyártók gépeinek vizsgálatára irányuló információgyűjtésem során többféle konstrukciós megoldást tapasztaltam. Minden lézerrezonátor-típusra elmondható, hogy a rezonátor gépgyártónkként változik, mivel a helytakarékosság és a teljesítmény aránya nagyon befolyásolja konstrukciót és a fejlesztés irányelveit is. A géptest, a vágóasztal és a kiszolgáló szervek nagy területet foglalnak el a felhasználó csarnokában, emiatt fejlesztéseket eszközöltek mind a rezonátortest mérete, mind pedig a kiszolgáló eszközök elszeparálása tekintetében. A hűtőfolyadék-keringető rendszer, a nagyfrekvenciás generátorok és az egyenáramú gerjesztéshez nélkülözhetetlen transzformátorok mind a rezonátorelemtől elkülönítve végzik munkájukat.

### 5.5.1. A rezonátor belső elrendezése

A nagyobb teljesítményű gépeknél látható, hogy a rezonátorcső nem egy hosszú elem, hanem azt megtörve több rövidebb, külön gerjesztett csőből áll, és a lézersugár-kicsatolásokat terelőtükrökkel egymásba erősítve hozzák létre. A Trumpf rezonátoránál figyelhető meg egy négyzetes elrendezés, amelynél két szintre tagolva oldották meg a gerjesztést, és ennek segítségével egy hosszabb rezonátorcső helyett több, szakaszokra osztott rezonátoregység gerjeszt kisebb helyen és jobb vezérelhetőséggel. Minden csőtest külön nagyfrekvenciás gerjesztő hasábokkal rendelkezik, amelyeket párban egymással szemben állítva helyeznek fel a rezonátorcsőre. A hőcserélőket a gép felső részén helyezték el és onnan érkezik a gázelegy a szívóoldalra. A radiális turbóventillátor a rezonátortest középpontján helyezkedik el.



A további gyártóknál is tört kivitelű rezonátorokat találtam, amelyben külön gerjesztődnek a csőtagok. Az Amada esetében a lézer gerjesztésének különbségét az elrendezésen túl a nagyfrekvenciás elektródák kialakítása adja, mivel nem hasáb alakú kivitel, hanem egy általuk fejlesztett és preferált spirális megoldást alkalmaznak.

## 6. A lézerrezonátor tervezése

### 6.1. A tervezés alapja és céljai

A mechanikai tervezésem alapja egy lassúáramlású, axiális, DC gerjesztett CO<sub>2</sub> lézerrezonátor elvi kialakításának bemutatása, amely megoldást jelenthetne jelölési és kisebb vágási feladatok biztonságos elvégzéséhez. Kialakítása alapjaiban a komolyabb, ipari lézervágógépek lézerrezonátoraihoz igazodik.

A legfontosabb célkitűzés, hogy egy olyan berendezést tervezzek, amelynek karbantartási és szervizelési igénye alacsony, külső problémákból adódó meghibásodás esetén gyorsan, nagy biztonsággal javítható, és folyamatos üzemmód mellett is biztosítja a lézer kicsatolásának minőségi és teljesítményi kritériumait. A rezonátor elvi alapja egy lassúáramú lézerrezonátor, amelyet – a hosszméretek optimalizálása végett – megtörve sugárvezető, 45 fokos terelőtükrökkel tervezek meg. Minden elem hűtőkörbe van csatolva, hogy az optimális üzemi hőmérséklet tartható legyen. A berendezés magasabb osztályú védelmet követel meg, így a teljes rezonátoregység védőburkolattal lesz ellátva. Tervezésem fontos irányelve, hogy olyan kompakt berendezést tervezzek, ami kis alapterületen elfér és ideálisan kombinálható egységet képezhet különböző célgépek kiszolgálásához.

Mivel a projektre fordítható anyagi erőforrások erősen korlátozottak, csak irányelvek alapján tudom berendezésemet prezentálni és a tervezésnél a berendezés lézergerjesztéséhez szükséges mechanikai részek kidolgozását tűztem ki célul. Az elektronika és a kiegészítő eszközöket csak irányelvek alapján és a szükséges tulajdonságaik alapján mutatom be.

### 6.2. Geometriai összefüggések [8][12]

Geometriai összefüggések segítségével – az általunk beépített tükrök adataiból kiindulva – meghatározhatjuk rezonátorunk stabilitását. Az általam kialakított konstrukció tükreinek (zárótükör, kicsatoló tükrök) geometriai paraméterei adottak és görbületi sugaruk ( $R_1$ ,  $R_2$ ) a plán parallel síktükrök ideálisnak mondható végtelen rádiuszához közelít, mivel jelen esetben:

$$R = R_1 = R_2 = 30 \text{ m.}$$

Fontos feladat meghatározni, hogy milyen esetben lesz stabil a rendszerünk, és ehhez szükséges görbületi paraméterértékeket kell kiszámítanunk, mivel a stabilitás mértékét a két optika görbületi paraméterének szorzata adja. A két görbületi paraméterérték kiszámításának módja az alapul vett forrás<sup>[12]</sup> szerint:

A számításhoz szükséges értékek:

$L = 1.910$  mm (a rezonátor két tükre közötti távolság)

$R_1 = 30.000$  mm (a zárótükör görbületi sugara)

$R_2 = 30.000$  mm (a kicsatoló tükör görbületi sugara)

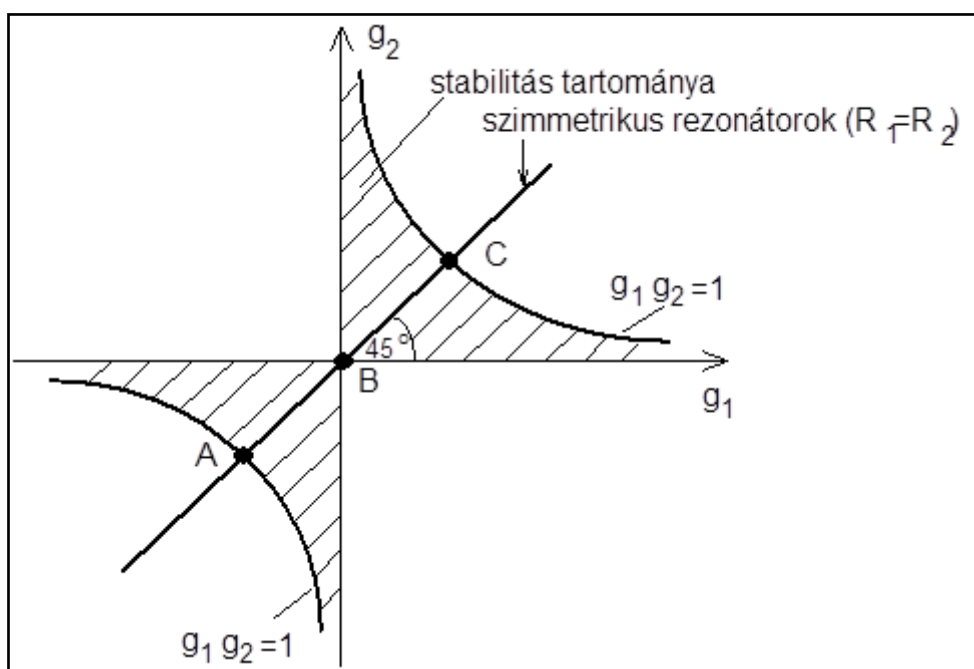
$$\begin{aligned}g_1 &= 1 - \frac{L}{R_1} \\g_2 &= 1 - \frac{L}{R_2}\end{aligned}\tag{10.}$$

$g_1 = 0,937$  (görbületi paraméter - zárótükör)

$g_2 = 0,937$  (görbületi paraméter - kicsatoló tükör)

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1\tag{11.}$$

$0 < \mathbf{0,877} < 1$  (stabilitási paraméterszorzat)



14. ábra Stabilitási tartomány[A6]

A görbületi paraméter értékek szorzataként kapott stabilitási paraméterszorzat értéke 0,877, amely – 1-hez közeli – értékből a rezonátorunk stabilitására következtethetünk.

Nagyteljesítményű rezonátorok esetében nem mindig előnyös a legstabilabb állapotra való törekvés, mivel a rezonátoregységekben a lézergázok hasznosított térfogata különböző lehet, ami nagyban befolyásolhatja a kicsatolás utáni lézerteljesítményt. Emiatt például, ha egy szimmetrikus konfokális rendszert vizsgálunk, akkor a rezonátor erősítési hosszának centrumában a Gauss-nyaláb sugárderék-átmérője már sokkal kisebb mint a tükrök közelében, ami nagyban csökkenti az üregben gerjesztésre szánt médium gázhozamát. Síktükrős rezonátor esetében a rezonátorüreg tengelyével párhuzamos nyaláb sokkal jobb hozamot képes produkálni, persze számolnunk kell a stabilitási paraméterszorzat 1-es értékhez konvergálásával, ami pedig érzékennyé teszi a rendszerünket. Az általam felhasznált optikák és a meghatározott gerjesztési csőhossz egy ideális átmenetet képeznek a hozamra és a stabilitásra való törekvés között.

A közel ideális rezonátorgeometria hatással van a lézersugárnak – a 3. fejezetben tárgyalt – sugárteljesítmény és sugárminőség értékeire. Az optimális sugárteljesítmény a megfelelő gázhozam „lecsapolásával” biztosított, a sugárderék a centrumban ( $L/2$ ) viszonylag nagy átmérőn marad, amely nagyban befolyásolja a divergencia értékét, mivel minél nagyobb átmérőn vezetődik a lézernyaláb, annál kisebb a divergencia értéke. Ha egy jól vezérelt gerjesztéssel együtt történik a kicsatolás, akkor az elérhető  $K$  sugárminőség a piacvezető gyártók által elért  $K=0,95$ -ös értékét is megközelítheti.

Abban az esetben, ha a gerjesztés nem felel meg méréseink után az általunk optimálisnak tartott és a technológiához szükséges értékeknek, akkor többféle megoldás is létezhet a rezonátor tulajdonságainak befolyásolására. A fő problémát az instabil állapot negatív hatásai okozhatják a rendszerben. Ebben az esetben kisebb görbületi sugarú optikákra való váltással vagy a rezonátor üreg hossz méreteinek növelésével tudunk a görbületi paraméterszorzat értéken változtatni és a középértékhez közelebb kerülni, amely nagyban javíthatja a stabilitást.

A gerjesztés folyamatát nem csak a geometria és a jó stabilitási érték határozza meg, hanem nagyon fontos szempont az ideális elektródák kiválasztása és azoknak az optimális módon történő elhelyezése, mivel befolyásolják – deformálják – a rezonátor gerjesztése közben a Gauss-nyalábot. A megfelelő vezérlés és a teljes elektromos rendszer külön tárgyalást érdemelne, viszont ez a terület jelentős elektrotechnikai tapasztalatot és tudást kíván, amely túlmutat a szakirányom és a jelen diplomaterv keretein. Az általam tervezett berendezésben egy egyszerű kivitelű, szimmetrikus katód oldal és anódgyűrűk segítségével történik a gerjesztés, amelyet megbízható laboratóriumi mérési eredmények alapján lehetne ideálisan

beállítani (szükség esetén a formájukat is változtatva), de ennek lefolytatására a lehetőségeim erősen korlátozottak.

Fontos megemlíteni, hogy mivel a rezonátorom hajtogatott kivitelű, a háromszintes erősítésből, valamint a terelőtükrök és elektródák formájából eredően nem tudok pontosan következtetni a sugárnyaláb torzulásaira, az emiatt bekövetkezett interferenciára és hatásfokcsökkenésre, hiszen ehhez laboratóriumi körülmények közötti tesztelési lehetőségekre lenne szükség, amelyek a diplomaterv elkészítése során nem álltak rendelkezésemre.

A 3. fejezetben kitértem a lézerefény főbb minőségi jellemzőire és az ott felvázolt összefüggések azok, amelyek segítségével a lézernyaláb legfontosabb tulajdonságai leírhatóak. Nagyteljesítményű lézerezonátorok sugárértékeire vonatkozóan az összeszerelés utáni tesztelés során, ipari etalonon végzett próbagerjesztéssel és kicsatolással képesek mérni a lézerteljesítményt és a berendezés egyéb fizikai tulajdonságait, majd ebből adnak – visszszámítási eljárások útján – pontos kimeneti értékeket.

Annyi általánosságban elmondható, hogy vágás céljából való felhasználás esetén a legfontosabb mutatónak – a 3. fejezetben levezetett  $K$  sugárminőségi tényezőnek – jól beállított rendszer esetén közelítenie kell az ideális 1 értékhez. Az általam megvizsgált gyártók berendezéseinek gyári  $K$  értékei minden kivitelnél elérik a 0,95-ös értéket, ami a 3. fejezetben ismertetett egyenletek segítségével a kicsatolt sugárteljesítmény ismerete mellett visszszámolható lenne.

Ha az általam tervezett berendezés nem érné el a kívánt  $K$  értéket, akkor vannak lehetőségek a minőség növelésére. A legfontosabb javítási lehetőség a tükrök geometriájának állítása, mivel ha a záró-, kicsatoló és terelőtükrök nem megfelelően állnak, akkor az erősítés vagy veszít a hatásfokából (legrosszabb esetben be sem indul), mivel az oszcillálás során a fotonok kitérnek az erősítésből, ami rossz hatással van a kicsatolt lézerefény teljesítményére.

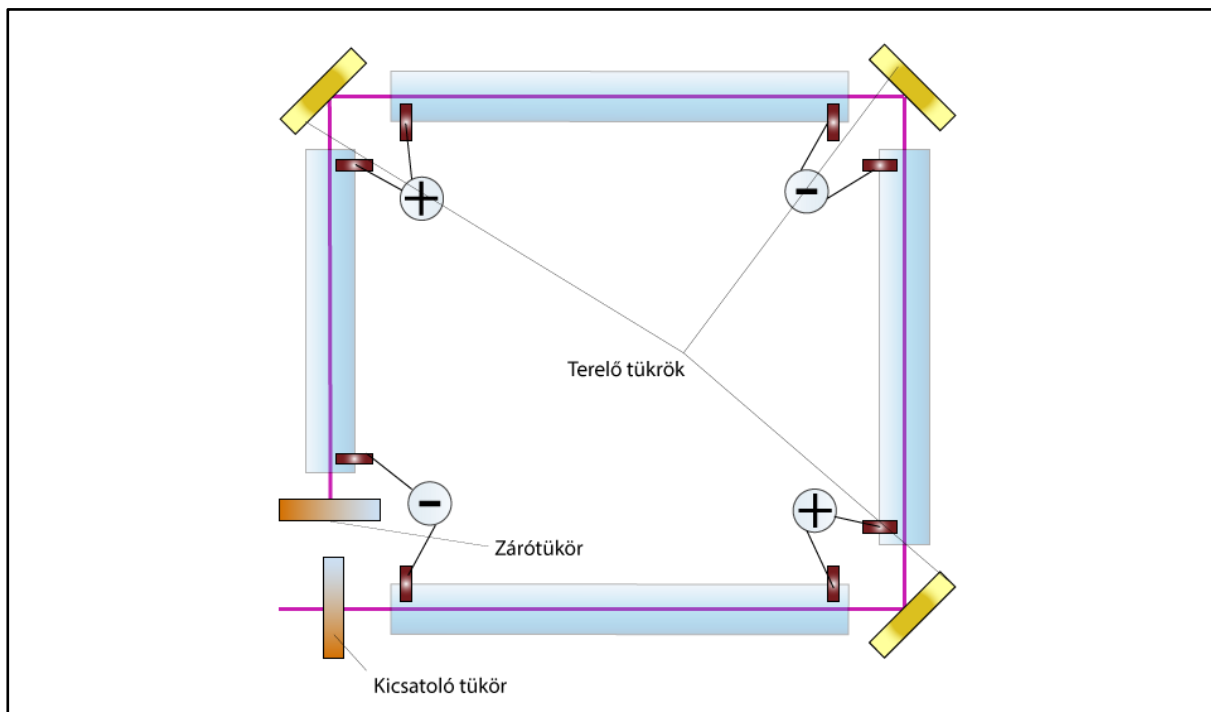
Fontos megfelelően meghatározni – és szükség esetén változtatni – az anód és a katód kialakítását. Számos megoldás létezik a DC gerjesztéshez szükséges elektróda kiképzésére. A gyakorlatban minden gyártó más kialakítást és anyagminőséget szerel be, és sok gyártó le is védi ezen kialakításokat. Anyagát tekintve lehet alumínium elektródákkal is kísérletezni, vagy az általam tervezett berendezés esetében a hidegelektrodák kialakításán szükséges változtatni. A katód oldal elhelyezkedése, szimmetrikus beépítése és az elektródák mélysége a rezonátor

csőtengelyéhez viszonyítva a legfontosabb változtatási lehetőségek közé tartoznak a gerjesztés optimalizálása során.

A diplomatervem részét képező mechanikai tervezési feladat nem terjedt ki elektronikák tervezésére. Ezen egységek magas szintű, speciális szaktudást igénylő, a gyakorlatban villamosmérnök szakértők által konstruált berendezések, amelyekről csak említés szintjén szólok. A megfelelő elektronikai vezérlés a jó sugárgerjesztés egyik fontos letéteményese, mivel jól kialakított vezérlés segítségével érhető el a rendszerünk stabilitása és az egyenáramú gerjesztés feszültségigényének adott teljesítményhez szabott, optimális értéken tartása.

### 6.3. Kialakítási elvi bemutatása

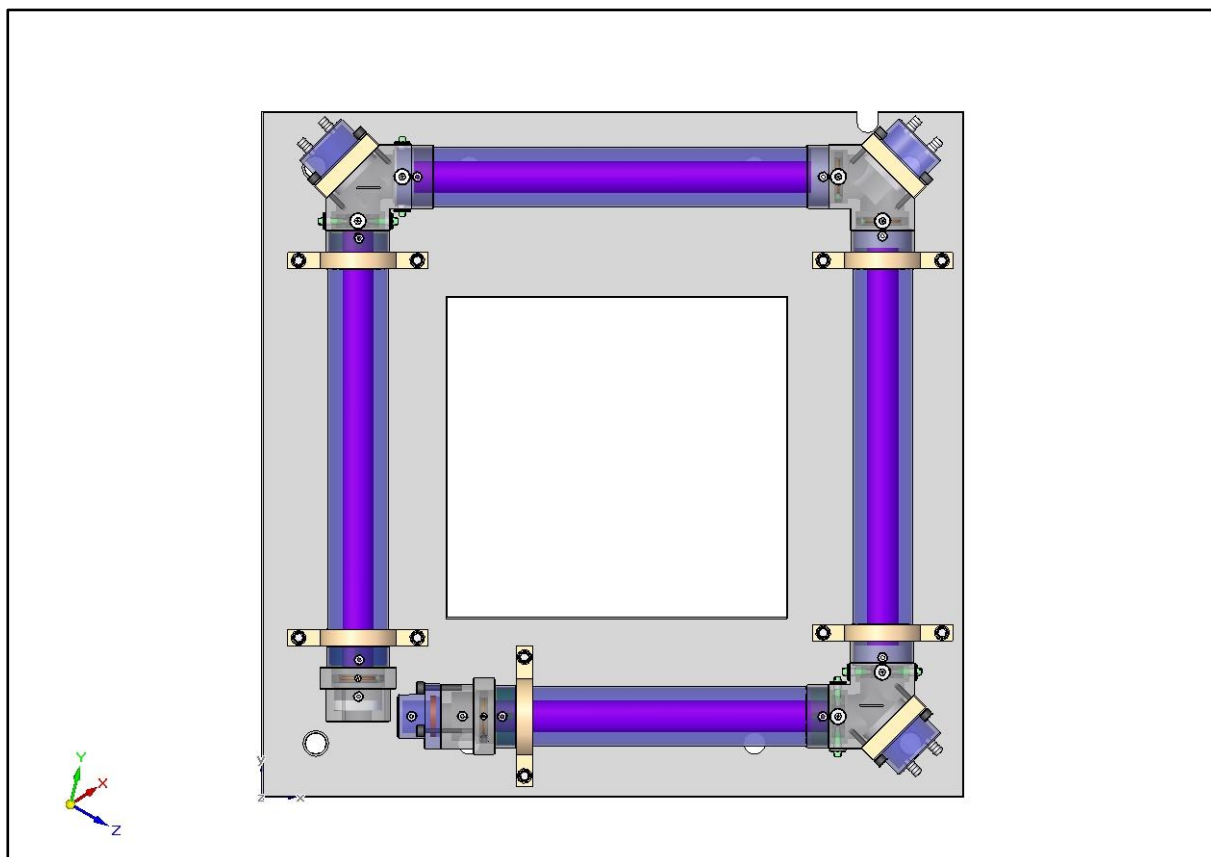
A modern eszközök szerkezeti felépítésére jellemző, hogy a rezonátorcső megtörve kerül kialakításra. A tervezett konstrukciónál egy négyzetes kialakítást választottam, ahol négy beépített rezonátorcső segítségével gerjesztem a lézermédiumot. Fontos leszögezni, hogy a nagyobb gyártók is használják ezeket az elveket, csak nem egyszintes, hanem többszintes rezonátorgerjesztéssel csatolnak ki nagyobb lézerteljesítményeket vagy egy szinten több törést alkalmaznak és párhuzamosan építenek be.



15. ábra  
Rezonátorcső elrendezés, tükrök és gerjesztés sematikus ábrája

A fenti 15. ábrán a tervezés elvi kialakítását bemutatni. Amint látható, a rezonátorcsővégeken külön-külön anód és katód gerjeszti a rendszert, amelyet katód-katód és anód-anód párral oldottam meg a berendezés sarkain.

A működési elv a következő: a lézercsőekben gerjesztés hatására feláll a lézermédiumon belül a populáció-inverzió és megindul a lézer gerjesztődése, amelyet a négy csőrészben a záró tükör és a kicsatoló tükör között – megtörve és a 45 fokos terelő tükrökkel terelve – felerősítünk. A felerősített lézersugár a kicsatoló tükrön keresztül – amely adott lézerteljesítménynél már áteresztő – átengedi az erősített lézersugarat, majd célgéptől függően ezen szakaszok után sugár formálódik. A kicsatolási szakasz utáni sugárvezetési elemek működésére nem térnek ki a tervezési feladatomban.



**16. ábra**  
**Rezonátorcső elrendezése, konstrukciós rajz**

A rendszer csak akkor képes hosszútávon fenntartani a kicsatolást, ha a hőmérsékletet a szerkezetben minél jobban lecsökkentjük, mivel egy adott hőfok után a gázelegy veszít elemi határfokából és nem lesz képes gerjesztődni. Fontos megjegyezni, hogy a nitrogénnek, mint puffer elemnek nagy jelentősége van a gerjesztés  $v_3$  szinten tartásában. Túlzott hőmérséklet

mellett a folyamat leáll, és a rezonátor lézermédiaja nem tud gerjesztődni. ennek a problémának a kiküszöbölését a teljes egység lokális hűtésével érném el. Nagyobb gyártók a vízűtés mellé turbóventillátor és hőcserélők beépítésével biztosítják az optimális hőmérséklet tartását. Fontos kitérni arra, hogy minden rezonátoregységet érzékelők beépítésének lehetőségével kell megtervezni, amelyek visszajeleznek a vezérlésnek a hőmérsékletről.

Az alábbiakban áttekintem a rendszer főbb elemeit és az általam választott beépítési megoldásokat.

### 6.3. A rezonátor főbb elemei és kiegészítői

#### 6.3.1 A rezonátorcső és a hűtőköpeny

A teljes tervezési fázis előtt a legfontosabb az ideális rezonátorcső kiválasztása. Az általam használt bórszilikát cső alapsőnek számít, amelynek tulajdonságai a következők:

##### Rezonátorcső:

- belső átmérő: 25,4 mm,
- külső átmérő: 29,4 mm,
- teljes gerjesztett hossz (4 tag): 1.520 mm,
- belső maximális nyomás: 17 bar,
- anyaga: Bórszilikát üveg,

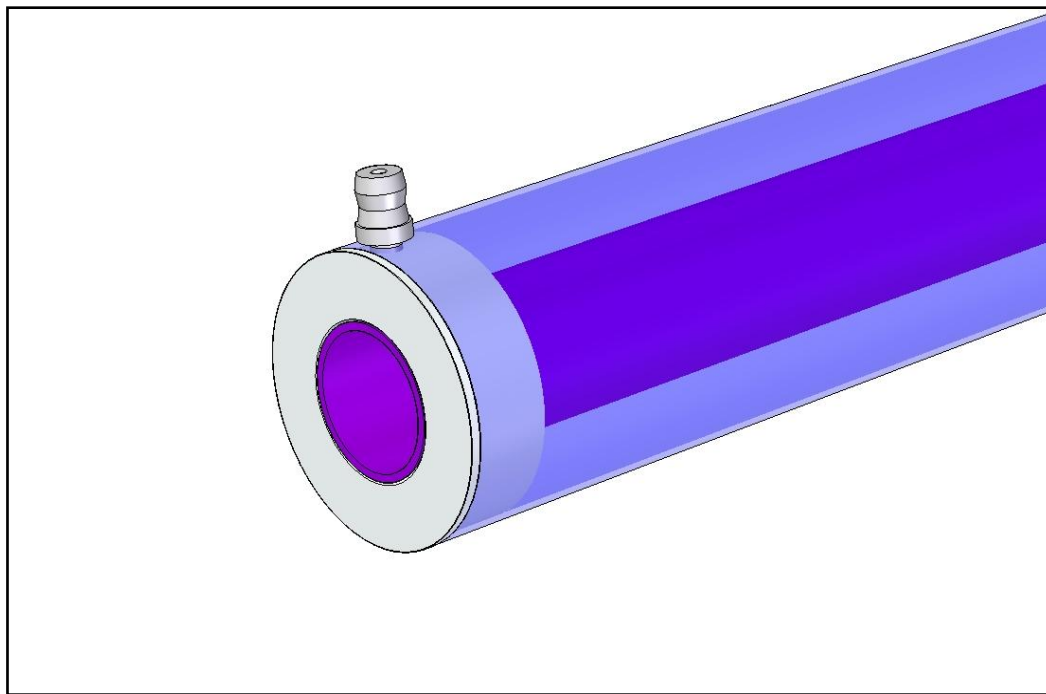
##### Hűtőköpeny:

- belső átmérő: 50 mm,
- külső átmérő: 55 mm,
- anyaga: extrudált, víztiszta plexi cső.

A rezonátorcsövet és a hűtőköpenyt úgy kell elszeparálnunk egymástól, hogy semmiféleképpen ne forduljon elő lézermédium- vagy hűtővízszivárgás, mivel a hűtővíz azonnal meghibásodást okozna a rendszerben.

A lézermédium bevezetését úgy alakítottam ki, hogy az a hűtőköpenyen fűrt lyukon keresztül vezetődik be, de végdugón keresztül történik a biztonságos átvezetés. A fenti 16. ábrán jól látszódik, hogy a cső központosítását a rezonátor cső két végére helyezett végdugó adja,

amely anyagát tekintve hőálló műanyag. A tokfuratba a hűtővíz áramoltatására szolgáló csőbiztosítókat helyezünk el és szigeteljük azokat (17. ábra).



**17. ábra**  
**Csőtesteket pozicionáló és elszeparáló végdugó**

A megfelelő összeszerelés után figyelni kell a csövek tisztaságára. A komolyabb lézerezonátorokat vákuumszobában rakják össze, hogy elkerüljék a szennyeződést, mivel ha az feltapad a kicsatoló lencsére vagy bármelyik tükkörré, akkor a használat során ráégg az optikára, mely jobb esetben csak a határfok csökkenését, de rosszabb esetben a tükkör szétolvadását okozza.

### 6.4.2. Optikai elemek a rezonátorban és azok tartóelemei

Az optikák elhelyezése és a legideálisabb kiválasztása nagyon befolyásolhatja a lézermínőséget. Többféle megoldást is használhatunk a lézermédium gerjesztésére, rezonáltatására.

Az optikák tekintetében az amerikai II-VI Incorporated által gyártott és forgalmazott optikákra esett a választásom.

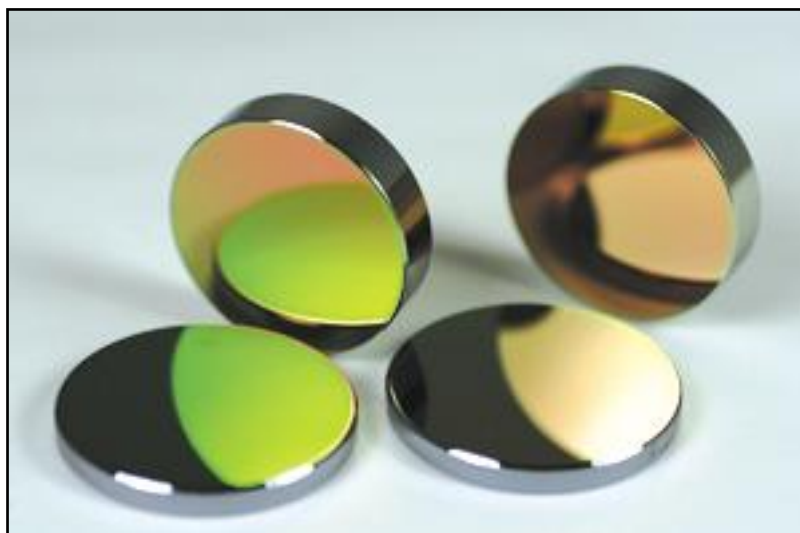


17. ábra  
ZnSe féligáteresztő kicsatoló tükör [A7]

Kicsatoló tükör tulajdonságai:

Anyag:	ZnSe
Átmérő [mm]:	30
Vastagság [mm]:	5,99
Tűrés (átmérő) [inch]:	+0,000”-0,005”
Tűrés (vastagság) [inch]:	+0,005”-0,010”

Reflektálási mutató [%]:	65
Felületi geometria (1-es oldal):	30MCC
Felületi geometria (2-es oldal):	30MCX



**18. ábra**  
**Zárótükör [A8]**

A választott zárótükör tulajdonságai:

Anyag:	GaAs
Átmérő [mm]:	30
Vastagság [mm]:	5,99
Tűrés (átmérő) [inch]:	+0,000''-0,005''
Tűrés (vastagság) [inch]:	+0,005''-0,010''
Reflektálási mutató [%]:	99,7
Felületi geometria (1-es oldal):	30MCC
Felületi geometria (2-es oldal):	30MCC

Az optikák beállítása, a helyes központosításuk egy kisteljesítményű lézerdíóda segítségével történhet. A rezonátorcső legjobb gerjesztését jól központosított optikákkal érhetjük el. Az általam kiválasztott optikák párba állítva képesek a gerjesztés ideje alatt a megfelelő erősítést létrehozni, emellett az optikák állítócsavarjaikkal könnyedén szabályozhatóak.

A központosítás legfontosabb lépései, hogy a kicsatoló lencse felhelyezése előtt az alumíniumból készült tartót a csavarjaival megfelelően rögzítjük, majd a teszt során a lézerdíódával végzett „próbalövésekkel” ellenőrizzük a kicsatolt lézersugarat.

Az optikák tisztítását a felhelyezés előtt fontos alaposan végrehajtani, erre a célra direkt kapható acetonos mosó, mely teljesen letisztítja a lencse, illetve tükröz felületét. A legfontosabb, hogy ne sérüljön a tükröz felület, hiszen minden karc vagy folt az abszorpciós mutatók változásához vezetne.

A tartóegységek megfelelő kialakítása fontos szempont, hiszen rendkívül stabilan kell tartaniuk a rezonátorcsövet. A gépre felhelyezett rezonátoregységet csillapítani kell, mivel a rezgésekre nagyon érzékeny az optikarendszer. Emiatt a tartókat plexiből terveztem és tömítésnek, valamint csillapításnak gumit használtam. A stabilitás végett öt darab csőtartó fogja tartani a rezonátor egységet. A csatolt HG-01 számú rajzon a kialakítás megfigyelhető.

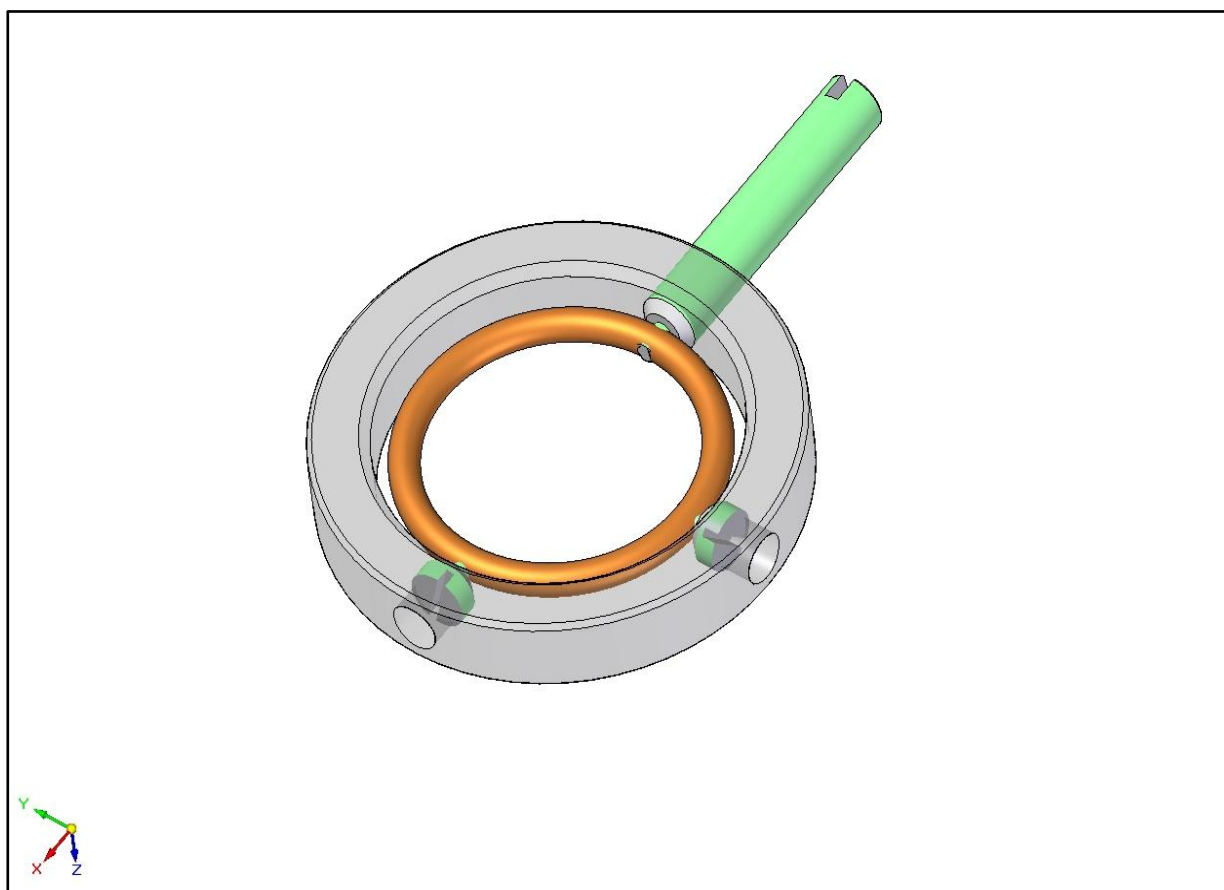
### 6.4.3. Áramellátás és bevezetések

Az anód és a katód elhelyezése nagyon fontos szempont, ha jó gerjesztési áthúzást és kiváló plazmát szeretnénk elérni. Az általam tervezett berendezés annyiban eltér a mai modern berendezésektől, hogy nem rádiófrekvenciás (RF) gerjesztéssel, hanem egyenáram (DC) segítségével történik a lézermédium aktiválása. Fontos megemlíteni, hogy ezen eljárást az RF gerjesztés óta a gyártók visszaszorították, mivel az elektródákról gerjesztés hatására anyagreszecskek válhatnak le, ami problémákat okozhat hosszútávon, hiszen keveredve az eleggyel (esetleg feltapadva) a rezonátor hatásfokának csökkenéséhez vezethet, rosszabb esetben pedig működésképtelenné is teheti azt. A gyártók között akad olyan, aki ennek a megoldására egy bonyolultabb kialakítással elősegítette a lehulló részecskek leülepedését a rendszerben, hogy azok ne tudjanak az optikákra tapadni.

A DC gerjesztéssel történő médiumgerjesztés hatásfoka 10-15%-kal magasabb, mint az RF gerjesztésé, illetve a laboratóriumi kísérletekhez építési és üzemeltetési költségeik miatt is jobban használható berendezések. A jelen projekt korlátai miatt egy egyszerűbb kivitelt konstruáltam, ahol az anód gyűrű alakú, a katód pedig négy elektródatartóban – 90 fokonként leosztva – helyezkedik el (20. ábra).

A gerjesztéshez szükséges tápegység és transzformátorok könnyedén beszerezhetőek és beépíthetőek. Elvi mechanikai tervezésben nem térnek ki ezen egységek tulajdonságaira, de irányértékként 10-20 kV tartományon belül gerjeszthetünk egyenárammal meghibásodás nélkül, jó nyálábminőséget biztosítva. Kisteljesítményű lézereknél, mint az általam tervezett is, ez a megoldás a leggazdaságosabb.

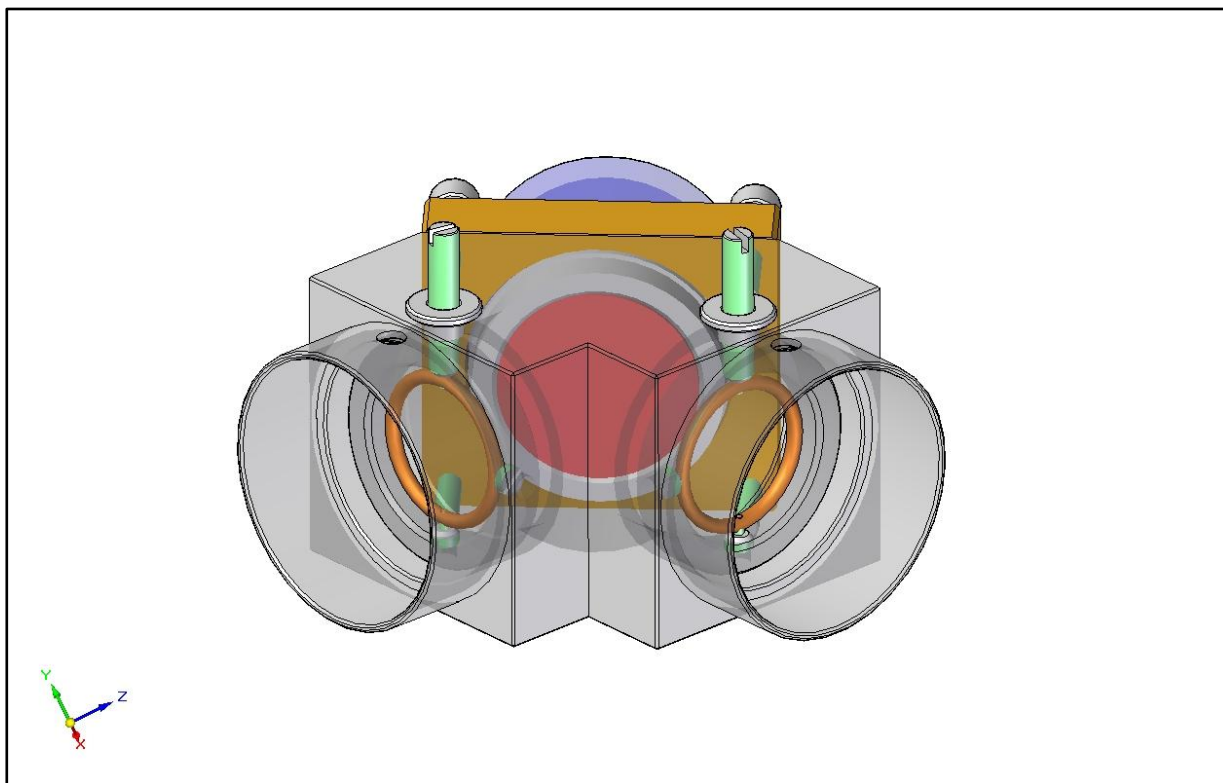
#### 6.4.3.1. Anód kialakítása és beépülése



**19. ábra**  
Anódgyűrű és pozícionáló elemei

Az anód a rezonátorban – két pozícionáló elem és az árambevezető segítségével pozícionálva a gyűrűn belül – helyezkedik el. Az anód hidegelektroda, amely koncentrikus a rezonátorcső végével, és nagyban meghatározza a plazma formáját és emiatt a gerjesztés minőségét is. A tartóban mindhárom pozícionáló elem állítható és könnyen mozgatható. A tartó anyaga alumínium, az árambevezető porcelánbetétes elektróda. Egy anódpár található az egyik sarokpont terelőegységében (21. ábra) és egy-egy anód van beépítve a kicsatoló fejbe és a záró fejegységbe is. Az utóbbi két egységben a beépítés elve teljesen megegyezik a 21. ábra

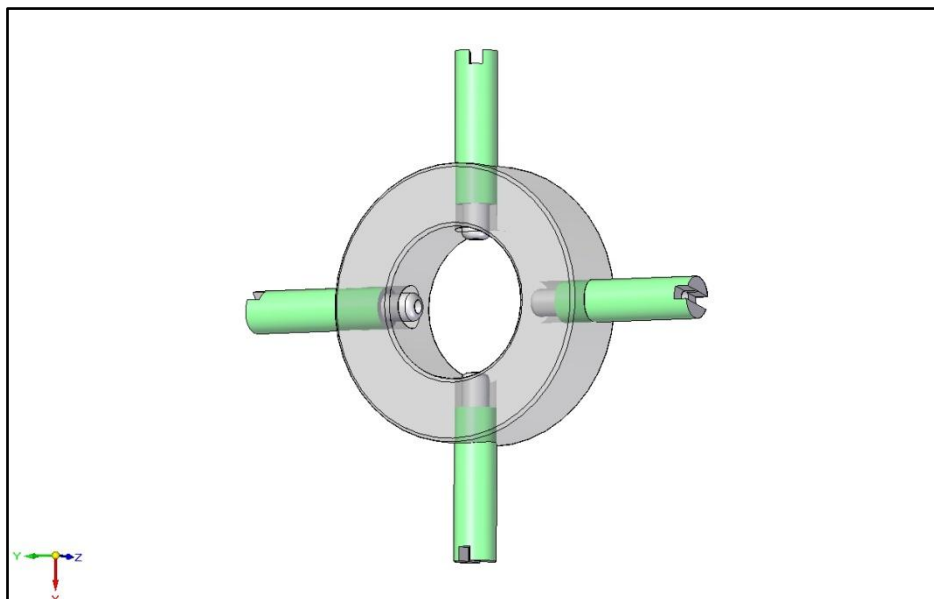
megoldásával. A diplomamunkámhoz csatolt HG-01-es rajzon megfigyelhető az egységek konstrukciója.



**21. ábra**  
Anódelhelyezés a terelőegység fejében

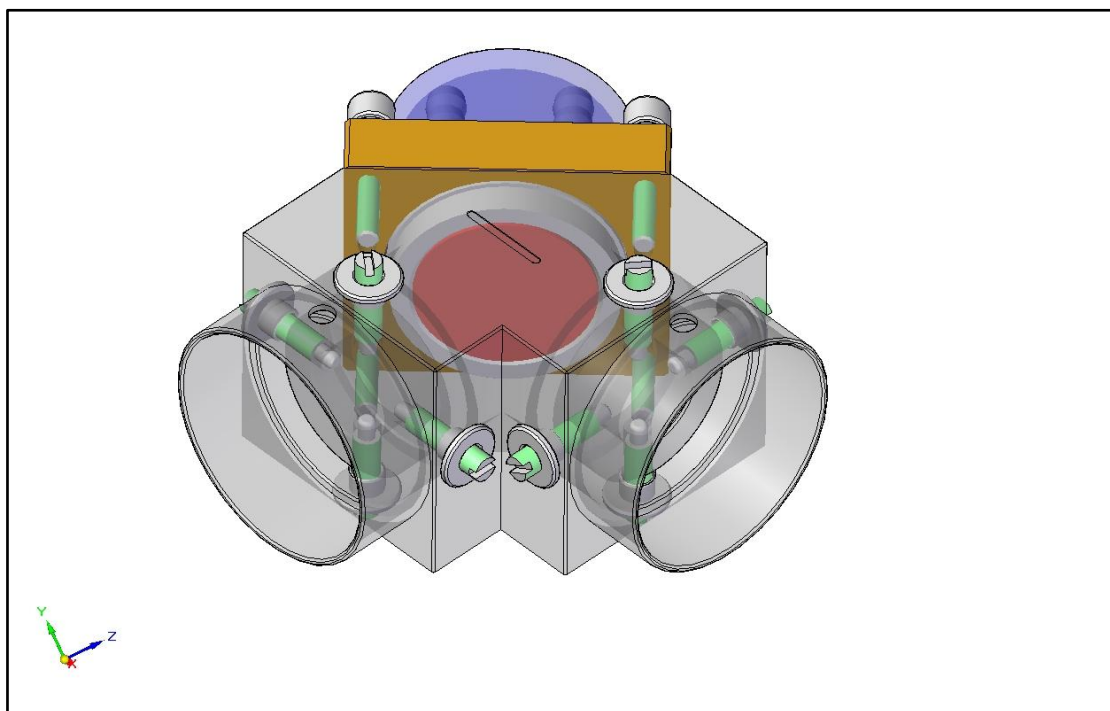
#### **6.4.3.2. A katód kialakítása és beépítése**

A katód kialakítása egyszerűsített mechanikai tervezésben is láthatóan négy elektróda szimmetrikus beépítésével történik. Ez az alapszintű elrendezés, minél több külön elektródaágat alkalmaznánk, az annál jobb gerjesztést tenne lehetővé. Nagyteljesítményű rezonátorok esetében – ahol a rezonátorcső átmérője akár a három-négyszerese is az általam tervezettnek – a katódoldalon akár 16 szimmetrikusan beépített elektróda is lehet.



**22. ábra**  
**Katód kialakítása és elemei**

A teljes rendszerbe, két terelőegységbe két pár katódelem kerül beszerelésre, amelyek a csőhosszt az anód felé gerjesztik, a csőrendszerben fellépő populáció-inverzió hatására kilépő fotonok – amelyeket a terelő tükrök segítségével vezetünk végig a tört szakaszokon – pedig erősítődnek a záró- és a kicsatoló lencse között.

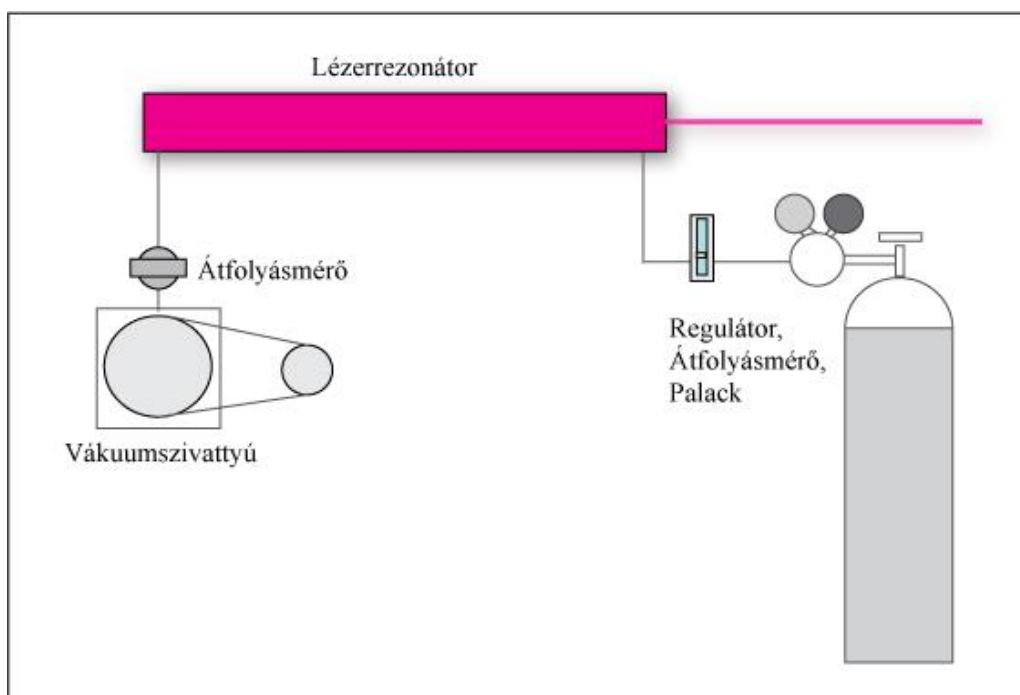


**23. ábra**  
**Katódelhelyezés a terelőegység fejében**

Az elektródák hűtését ennél a konstrukciónál nem szükséges külön megoldani, hiszen nem nagy teljesítményű lézerrezonátorról beszélünk. Kísérleti lézerrezonátoroknál általában a csőelektróda megfelelő hőleadását kötelező megoldani, mert rövid időn belül tönkremenne.

#### 6.4.4. Gázok a rezonátorban

A gázszállítás a rendszerben egy fontos tényező, mivel a lézermédium gerjesztése során a gáz használódik, egyes alapelemei bomlanak és idővel veszítenek a gerjesztési hatásfokukból. A gázok bekötésénél három aljzatot különítettem el a három különböző palack számára. A megfelelő gázkeverék kialakításához szükséges vezérlés fogja adott nyomásérték mellett nyitni a három csatlakozóról a gázokat. Mindhárom felhasználni kívánt gáz külön regulátorral van ellátva, mivel azok nagynyomású palackban kerülnek beszerzésre.



22. ábra  
Gázmozgatás egyszerűsített sematikus vázlata

##### 6.4.4.1 Gázfajták és arányaik

A lézermédiumot a három alapgáz ( $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ) meghatározott arányú keverésével fogjuk előállítani, majd egyenárammal gerjeszteni a rezonátortérben. Fontos megjegyezni, hogy a gyakorlatban a konstrukciókat tesztkörnyezetben, teljes monitoringolás mellett vizsgálva határozzák meg a legideálisabb gázkeveréket. Mivel tesztelésre nem nyílt lehetőségem, a

gyártók által alkalmazott keverékarányokból kiindulva az általam előzetesen előirányzott gázkeverék elméleti keverési arányai:

CO<sub>2</sub>: 3%

N<sub>2</sub>: 24,5%

He: 72,5%

#### 6.4.4.1. Rezonátorgázok tisztasági követelményei [4]

A rezonátor működéséhez az ideális gáztisztaság nélkülözhetetlen elem, hiszen minél tisztább a keverékünk, annál jobban gerjeszthető a lézermédium. A forgalmazók minden esetben tisztasági fokozattal látják el a palackokat, amely pontjelölésként határozza meg a gázzennyezők maximális összes koncentrációját, amely ppm („part per million”) értékek lekérhetőek. Ha CO<sub>2</sub> gázpalackot vásárlunk és a pontjelölés értéke 5.0 (legtisztább), akkor az átszámítva annyit jelent, hogy 10 ppm a szennyező anyagok aránya a tartályban, tehát százalékarányban kifejezve 99,999% tisztaságú gázzól beszélünk.

#### 6.4.4.1. Rezonátorgázok szennyezői [4]

Nagy figyelmet kell fordítani a rezonátor lézermédiumába keveredett szennyezőanyagok arányaira, mivel nagyban befolyásolni tudják a lézerműködést. Emiatt minden indítás előtt vákuumot kell képezni az üregben és úgy feltölteni gázeleggyel a rendszert. Folyamatosan áramoltatjuk a gázt, mivel használat során az összetevők aránya változik, a bomlás miatt a gázelegy elhasználódik. Felsorolás szintjén megemlíteném a szennyezőket és hatásait.

A szénhidrogének bomlásának elkerülése a legfontosabb lépés a gázok kiválasztásánál, és 1 ppm szint alatt kell tartani őket, mivel nemcsak a rezonátor gerjesztését zavarják, hanem a bomlásuk során az elemeik lerakódhatnak az optikákra és a rezonátor egyéb belső elemeire, ami eleinte teljesítménycsökkenést, majd meghibásodást is okoz a rendszerben.

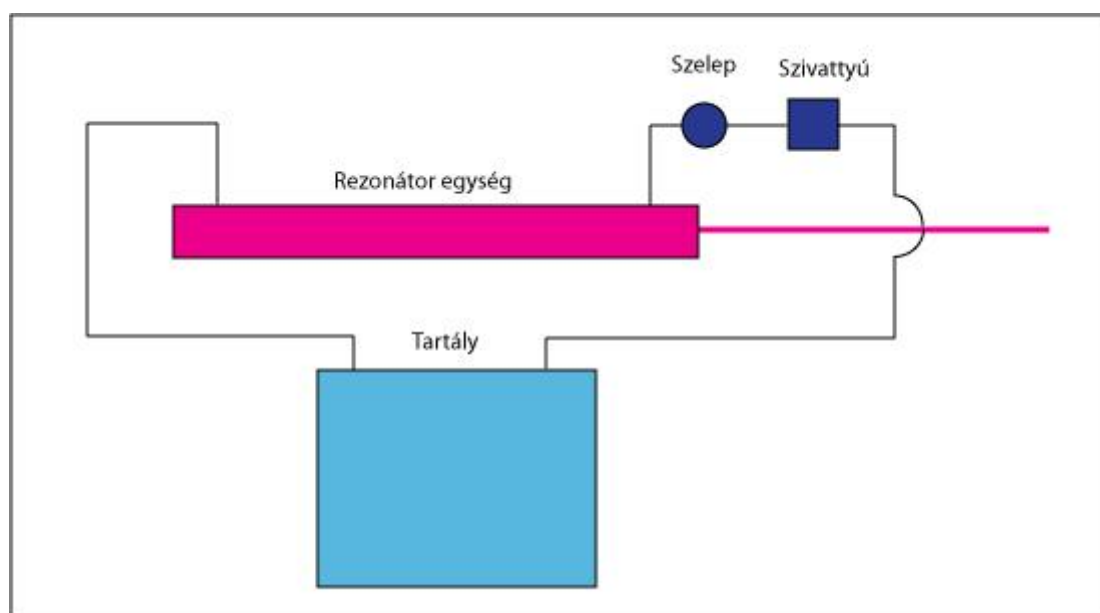
A vízgőz jelenléte a legérdekesebb a rezonátorok esetében, hiszen keresztáramú rezonátornál a stabilitást negatívan befolyásolja, viszont DC elektródás egyenáramú gerjesztésnél akár előnyt is jelenthet.

Az O<sub>2</sub>, illetve a CO maximum 1.000 ppm arányban jelen lehet az rezonátorüregben. Igazából nem befolyásolják a rezonátor működését, bár egyes gyártók keresztáramú rezonátoroknál olyan lézergázokat preferálnak, amelyekben megtalálható körülbelül ennyi tömegszázalékú oxigén molekula. A szénmonoxidnak nincs hatása a rezonátorra.

Fontos elemek a nitrogén-származékok ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  és  $\text{N}_2\text{O}_3$ ), amelyek nem a palackból kerülnek a rendszerbe, hanem a gerjesztés folyamatában keletkeznek, ezek káros tulajdonságai a rendszer fokozzák a rendszer instabilitását.

A gázkeveréket folyamatosan keringetni és cserélni kell a rendszerben. Indításnál teljesen tiszta üregbe kell áramoltatni a gázelegyet.

#### 6.4.4. Hűtővíz és hűtőrendszer

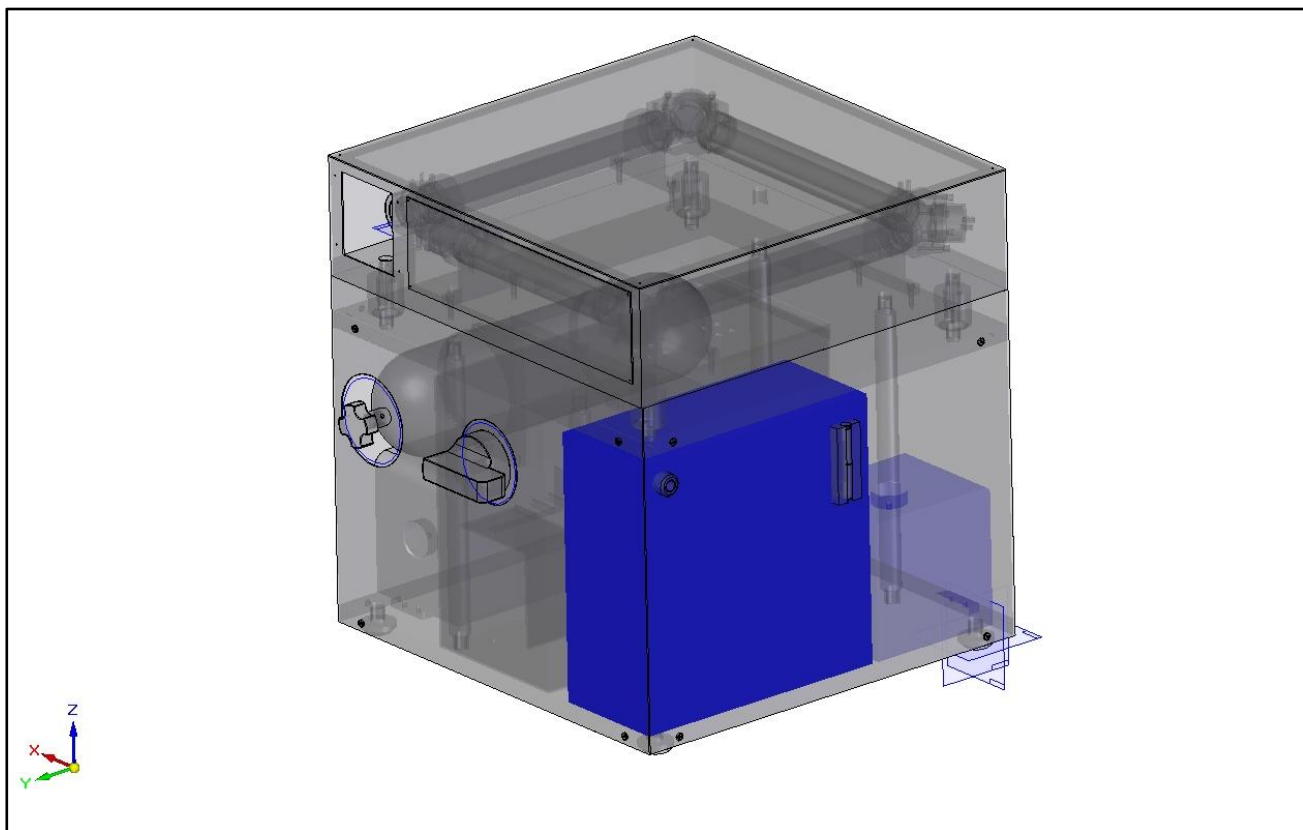


23. ábra  
A rezonátoregység hűtésének sematikus vázlata

A hűtés talán a berendezés egyik legegyszerűbb része, hiszen egy tartály és egy kisteljesítményű keringető szivattyú beiktatásával megoldható a hűtővíz cirkuláltatása a rendszerben. A tervezés során nagy figyelmet kell szentelni a biztonságra, mivel a berendezés kompakt mérete miatt a vezérlés és az elektromos rendszer nagyon közel helyezkedik el a hűtéshez és a hűtővízhez, ami problémákat okozhat. Fontos tudni, hogy a szerkezeti elemeket tökéletesen leszigetelve és a teljes rendszert földeléssel ellátva szükséges beépíteni.

Érdemes keringető szivattyúból olyan fajtát beépíteni, melynek élettartama biztosítja a hosszú távú üzemeltetést. A komolyabb lézervezérések lehetővé teszik az átfolyás mérők visszajelzései alapján a rendszer hűtési intenzitásának optimális értéken tartását. Fontos, hogy a hűtővíznek minden esetben nagy tisztaságú, ioncserélt,  $20 \mu\text{S}$  (mikrosiemens) vezetőképességi érték alatti hűtővíznek kell lennie, mivel a nagy tisztaság elsősorú szempont. Fontos kiegészítő lehet a lerakódások és gombák elleni tisztítószer és ezekhez a

megfelelő szűrők beépítése a rendszerbe. Nagyobb lézerberendezések esetében a hűtővíz-keringetésbe akár 500 liter hűtővizet és kétféle szűrőt is beépítenek.



**24. ábra**  
A hűtésért felelős szivattyú és a hűtővíztartály

A tartály belső méretei:

- $L_x = 500 \text{ mm}$
- $L_y = 170 \text{ mm}$
- $L_z = 480 \text{ mm}$
- $V_1 = X Y Z = 40.800.000 \text{ mm}^3 = 40,8 \text{ dm}^3$

Tehát a hűtőkörhöz megközelítőleg 40 liter hűtővíz áll rendelkezésünkre a tartályban. Szükséges meghatározni a csőhosszakat és a hűtőköpenyben lévő hűtővíz térfogatát. Az általam megkonstruált összeállítási rajz szerint a hűtőköpeny paraméterek a következők:

- $L = 1.500 \text{ mm}$  (teljes hűtőhossz)
- $D_1 = 55 \text{ mm}$  (hűtőköpeny belső átmérője)
- $D_2 = 29.4 \text{ mm}$  (lézercső külső átmérője)

- $V_2 = (R_{12} - R_{22}) \pi L = 48,8 \text{ dm}^3$

A teljes hűtőkör feltöltéséhez számításba kell venni a csőhosszakat és a tükrök hűtésére szolgáló kisebb hűtőtereket.

- $L_{\text{cső}} = 780 \text{ mm}$  (szoftver segítségével mérve)

- $D_3 = 10 \text{ mm}$  (cső belső átmérője)

- $V_3 = R_3^2 L \pi = 0,589 \text{ dm}^3$

A három terelőtűkör és a zárótűkör hűtőterének térfogata:

- $V_4 = 0,19 \text{ dm}^3$  így

- $V_{\text{összes}} = 90,379 \text{ dm}^3$

Ha bekötöttük a hűtővízrendszer csöveit, fontos kérdés, hogy a rendszert milyen hűtővízzel érdemes feltölteni. A nagy tisztaságú,  $20 \mu\text{S}$  alatti vezetőképességű ionizált víz egyik nagyon fontos tulajdonsága a jó hőelvonó képesség, a másik pedig, hogy a baktériumok, algák sokkal nehezebben fejlődnek ki a rendszerben és emiatt kevesebb alkalommal kell a hűtővíz csöveket, egységeket átmosni. Atmosásnál a szűrőt mindig cserélni kell. Ez egy egyszerű keringető szivattyú elé helyezhető ipari szűrővel megoldható. A mi esetünkben – mivel csak a hűtés a fő szempontunk – ha vigyázunk a feltöltésnél a tisztaságra, akkor még a szűrő hiánya sem okoz nagy problémát. Amint fent említésre került, a nagyobb lézerek esetében olykor 500 liternyi hűtőfolyadékkal látják el a berendezést, ez az általam tervezett, kompakt konstrukciónál mindössze közel 90 liter, ami változtatható és könnyen növelhető, ha a folyamat megkívánja azt.

## Összegzés

Diplomatervemben betekintést adtam a mai modern lézerrezonátorok és azon belül is elsősorban a CO<sub>2</sub> lézerek működésébe, amelyek még mindig piacvezetők a hazai ipari lézermegmunkálás területén.

Fontos célkitűzésnek tekintetem az általam tervezésre kiválasztott lézerrendszer minél alaposabb bemutatását és azt, hogy az tervezésem eredményeként egy elviekben működőképés és összességében jól konstruált berendezés álljon elő.

Diplomatervem 2. és 3. fejezetében elméleti alapvetésként vázlatosan ismertettem a lézer fizikai hátterét és áttekintettem a lézersugár fizikai jellemzőit, minőségi ismérveit.

A 4. fejezetet az iparban jellemző CO<sub>2</sub> és szilárdtest-lézer megoldásoknak szenteltem, amelyben különböző, elterjedt kialakításokat is bemutatam, majd végeztem egy rövid, a piacon gyorsan terjedő fiber lézerekkel történő összehasonlítást is.

Az 5. fejezetben a lézerrezonátorfajták és az ezekhez szükséges főbb segédelemek áttekintését követően kitértem az általam választott CO<sub>2</sub> lézerrezonátor főbb tulajdonságaira, tervezési irányelveire.

Az utolsó, a konstrukciós feladatot kifejtő 6. fejezetben bemutatam az általam megtervezett kompakt, egyenáramú gerjesztéssel működő, lassúáramlású rezonátor elvi tervezését és felépítését. A rezonátorüreg és az optikai elemek geometriájából kiindulva előzetes kalkulációkat készítettem a rendszer stabilitására vonatkozóan, majd bemutatam az optikák, az egyenáramú gerjesztés, a gázmozgatás és végül a hűtővízellátás rendszerének kialakítását.

A kifejtés és a tervezés során törekedtem a lézervágó berendezések gyakorlati üzemeltetése és karbantartása során szerzett tapasztalataim hasznosítására is, így bízom benne, hogy diplomatervem tartalmas és kellő gyakorlati relevanciával rendelkezik.

## Forrásjegyzék

**[1] Keszei Ernő: Femtokémia: a pikoszekundumnál rövidebb reakciók kinetikája**

A kémia újabb eredményei, 86. kötet – Akadémia Kiadó (1999)

**[2] Verőné Wojtaszek Malgorzata: Fotointerpretáció és távérzékelés (2010)**

[http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0027\\_FOI3/ch01s02.html](http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0027_FOI3/ch01s02.html)

(2015.12.01-i állapot)

**[3] LÉZERSUGÁRFORRÁSOK**

Kreisz István (2011)

[http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_23\\_lezersugar\\_forrasok/index.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_23_lezersugar_forrasok/index.html) (2015.12.01-i állapot)

**[4] LÉZERSUGARAS TECHNOLÓGIÁK I.**

Buza Gábor (2012)

[http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_50\\_lezersugaras\\_technologiak\\_I/index.html](http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0017_50_lezersugaras_technologiak_I/index.html)

(2015.12.01-i állapot)

**[5] IPARI GÁZOK A LÉZERTECHNIKÁBAN**

Halász Gábor (2012)

[http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_22\\_ipari\\_gazok/index.html](http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0017_22_ipari_gazok/index.html)

(2015.12.01-i állapot)

**[6] LASER CUTTING GUIDE FOR MANUFACTURING**

Charles L. Caristan (1999)

**[7] A lézerek működési elve, indukált emisszió, populációinverzió, tükrörezonátor**

Paripás Béla

[http://www.uni-miskolc.hu/~www\\_fiz/paripas/diagn/lezerek\\_diagn\\_15.pdf](http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/paripas/diagn/lezerek_diagn_15.pdf)

(2015.12.01-i állapot)

**[8] LÉZERTECHNIKA**



Dr. Ábrahám György, Dr. Lőrincz Emőke, Dr. Antal Ákos, Dr. Tamás Péter

<http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/lezertechnika/index.html> (2015.12.01-i állapot)

**[9] ÉLETÜNK ÉS AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK**

[http://fizipedia.phy.bme.hu/index.php/%C3%89let%C3%BCnk\\_%C3%A9s\\_az\\_elektrom%C3%A1gneses\\_hull%C3%A1mok](http://fizipedia.phy.bme.hu/index.php/%C3%89let%C3%BCnk_%C3%A9s_az_elektrom%C3%A1gneses_hull%C3%A1mok)

(2015.12.01-i állapot)

**[10] A hazai és a világpiacon meghatározó lézervágó berendezés gyártók honlapjai:**

[www.bystronic.com](http://www.bystronic.com)

[www.amada.com](http://www.amada.com)

[www.trumpf-laser.com](http://www.trumpf-laser.com)

[www.lvdgroup.com](http://www.lvdgroup.com)

[www.rofin.com](http://www.rofin.com)

**[11] Longitudinally Excited CO<sub>2</sub> Laser**

Kazuyuki Uno

**[12] Lézersugár-fizika**

Dr. Füzessy Zoltán (2012)

[http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017\\_32\\_lezersugar\\_fizika/ch03s03.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_32_lezersugar_fizika/ch03s03.html)

## Ábrák forrásjegyzéke

### [A1] LÉZERSUGARAS TECHNOLÓGIÁK I.

Halász Gábor (2012)

### [A2] LÉZERSUGARAS TECHNOLÓGIÁK I.

Halász Gábor (2012)

### [A3] Linear Polarization

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html> (2015.12.01-i állapot)

### [A4] Circular Polarization

[https://en.wikipedia.org/wiki/Circular\\_polarization](https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization) (2015.12.01-i állapot)

### [A5] Energy level diagram

<http://www.intechopen.com/source/html/40159/media/image3.jpeg> (2015.12.01-i állapot)

### [A6] Stabilitási tartomány

### LÉZERTECHNIKA

Dr. Ábrahám György, Dr. Lőrincz Emőke, Dr. Antal Ákos, Dr. Tamás Péter

### [A7] ZnSe féligáteresztő kicsatoló tükör

II-VI Optics - infrared

[http://www.ii-vi.com/business\\_units/infrared.html](http://www.ii-vi.com/business_units/infrared.html) (2015.12.01-i állapot)

### [A8] Záró tükör

II-VI Optics - infrared

[http://www.ii-vi.com/business\\_units/infrared.html](http://www.ii-vi.com/business_units/infrared.html) (2015.12.01-i állapot)

**A diplomatervező többi, a fenti felsorolásban nem szereplő ábrája saját készítésű.**



## Tervek, műszaki rajzok jegyzéke

[HG-01] Rajkszám

**Lézerrezonátor csőrendszerének és sugárvezetésének mechanikai konstrukciója**

[HG-02] Rajkszám

**Berendezés elvi mechanikai konstrukciója**