

Műszaki lézerfizika

5. előadás: A gázlézerek

Ismétlő kérdés

Tételezzük fel, hogy egy lézer keresztirányú alaplómódban működik, de több hosszirányú módusa is van. Válogassuk ki az igaz állításokat (3db)!

- a) Ilyenkor a legnagyobb a koherencia hossz
- b) Keresztirányú intenzitáseloszlását a Gauss-függvény írja le
- c) Ilyenkor a legkisebb a nyalábátmérő
- d) Jelölése TEM_{00}
- e) a precíziós lézerinterferométerekben ilyen lézer kell
- f) Ilyenkor a legkisebb a nyaláb frekvencia kiszélesedése

Megoldás: b), c), d)

Válasszuk ki a hibás állítást!

- a) Önfenntartó kisülés csak kis nyomású gázokban lehetséges
- b) A TEA lézerekben hosszirányú elektromos tér van
- c) Az első lézerben a villanólámpa csavarvonal szerűen körbevette a lézeranyagot
- d) A lézer longitudinális irányú fényrel táplálásához speciális zárótükör kell

A lézerek felfedezésének története

1916 Albert Einstein: „kvantum átmenetek” (feketetest sugárzás magyarázata, stimulált emisszió alapelve, Einsten-féle A és B koefficiens)

99 évvel később volt a fény világéve!!!

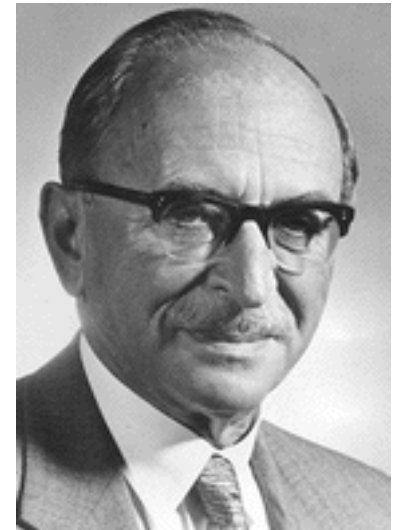
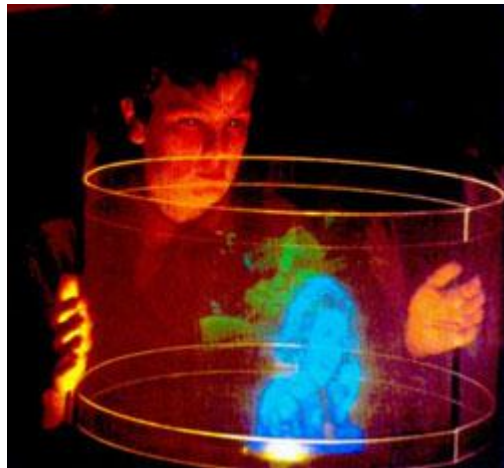
1928 Rudolph W. Landenburg: Stimulált emisszió („negatív abszorpció”) kísérleti biz.

Miért nem találták fel a fizikusok a lézereket már a 30-as években?

Mert akkor más érdekelte őket: az atommag.

1946 Felix Bloch, W. W. Hansen, Martin Packard (Stanford University): NMR-kísérlet első publikált populáció inverzió! fizikai Nobel-díj: **1952**

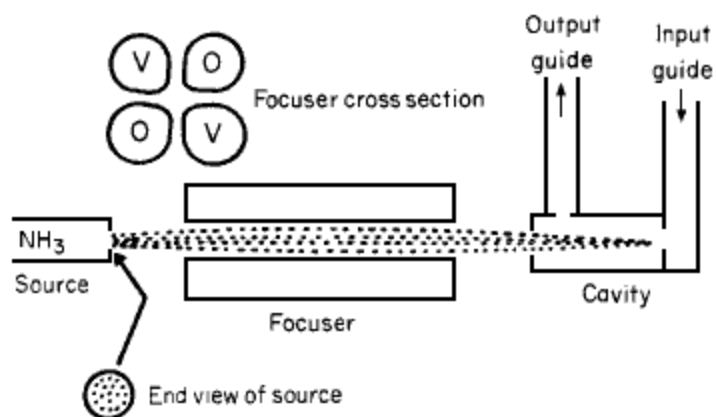
1947 Gábor Dénes:
holográfia alapelve
kivitelezés lézerekkel
Nobel-díj: **1971**



A lézerek felfedezésének története/2

1951 Charles H Townes (Columbia University): első MASER

(*Phys. Rev.* **95**, 282, 1954, *Phys. Rev.* **99**, 126, 1955.)



MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
(szkeptikus kollegái: **M**eans of **A**cquiring **S**upport for **E**xpensive **R**esearch)

1951 Alexander Prokhorov, Nyikolaj Basov (Lebegyev L., Moszkva): MASER
független megalkotása

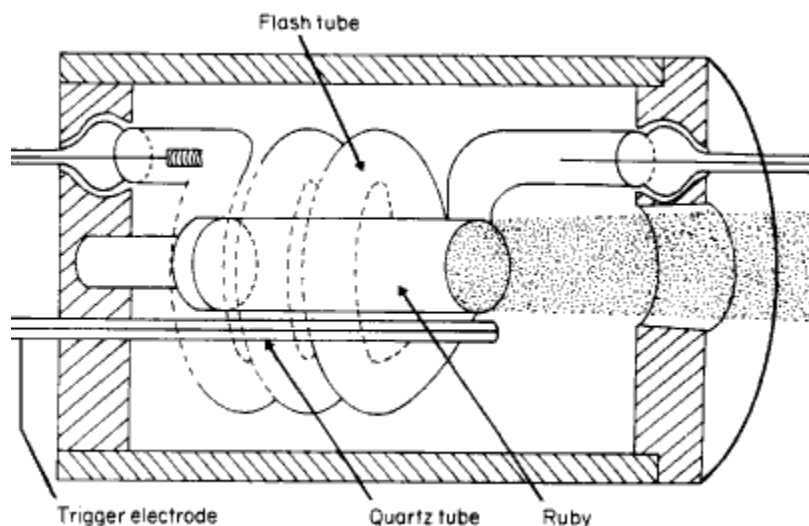
Nobel-díj (1964): Townes, Basov and Prokhorov

A lézerek felfedezésének története/3

1957 Gordon Gould (Columbia University): a lézerek működési elve („30 éves szabadalmi háború”) **LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

1958 Arthur L Schawlow and Charles H Townes (Columbia University): első cikk „optikai” MASER működési elvéről (*Phys. Rev.* **112**, 1940, 1958) **1960** szabadalom

1960 Theodore Maiman (Hughes Research Laboratories): első működő rubin lézer (*Nature*, **187**, 493, 1960)



60 éve volt!



A lézerek felfedezésének története/4

1961 Ali Javan, William Bennet Jr., Donald Herriot (Bell Labs.): első **He-Ne lézer** (*Phys. Rev. Lett.* **6**, 106, 1961)

1961 Columbia-Presbyterian Hospital: első orvosi alkalmazás

1962 Robert Hall (General Electrics): első **félvezetőlézer** (R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 366, 1962)

1964 J. E. Geusic, H. M. Markos, L. G. van Uiteit (Bell Labs.): első **Nd:YAG lézer**

1964 Kumar N Patel (Bell Labs.): első **CO₂ lézer**

1964 W. Bridges (Hughes Labs.): első **argonion lézer**

1965 G. Pimentel J. V. Kasper (University of California, Berkley): első kémiai lézer

1966 W. Silfvast, G. Fowles and Hopkins (University of Utah): első fémgőzlézer

1966 P. Sorokin, J. Lankard (IBM Labs.): első festéklézer

A lézerek felfedezésének története/5

- 1970** Nyikolaj Basov (Lebegyev Lab., Moszkva): első excimer (Xe_2) lézer
50 éve volt!
- 1977** J. M. Madey (Stanford University): első szabadelektron lézer
- 1980** Geoffrey Pert (Hull University, UK): röntgen lézerfény generálása
- 1980** S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips: atomok lézeres hűtése,
fizikai **Nobel-díj: 1997**
- 1981** A. Schawlow és N. Bloembergen: fizikai **Nobel-díj** nemlineáris optikáért és
lézer-spektroszkópiáért

Következtetés: a lézer első 20 évében szinte minden lézertípust felfedeztek (kivéve talán az ultrarövid lézerimpulzusok keltésére szolgálókat). A lézeres módszerek fejlődése, beépülésük a hétköznapokba, az elmúlt 40 év eredménye.

GÁZLÉZEREK

Lézeranyag: kis nyomású (néhány mbar) gáz, vagy gázelegy
(de lehet nagyobb nyomású is)

Lézerátmenet: atomi lézerek: átmenet atomi elektronszintek között
(UV és látható lézerek)
molekula lézerek: átmenet molekula rezgési szintek
(IR lézerek) és forgási szintek között (távoli IR)
ionlézerek: átmenet ionszintek között (UV és látható lézerek)

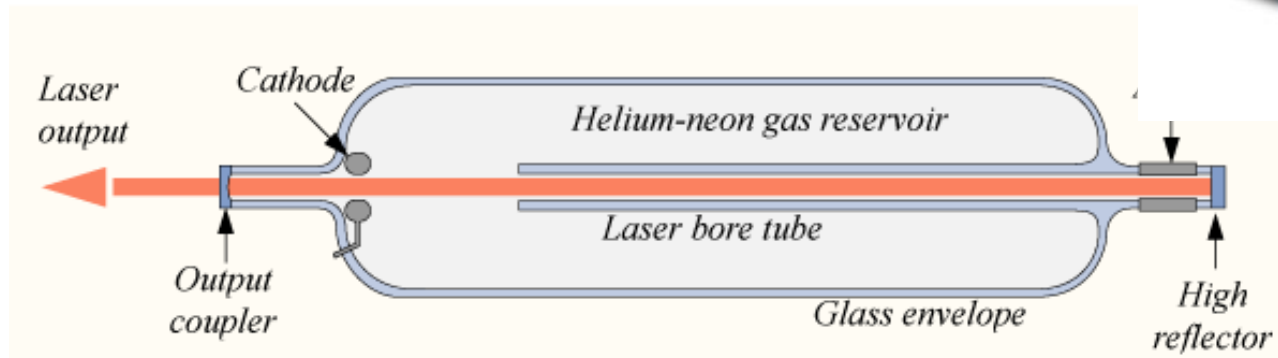
Pumpálás: elektromos energiával, gázkisülést létrehozva
(optikai pumpálásnak nincs értelme, mert a gázok abszorpciós vonalai keskenyek)

Méret: sokkal nagyobbak a szilárdtest lézereknél, mivel kisebb a lézeraktív anyag koncentrációja.

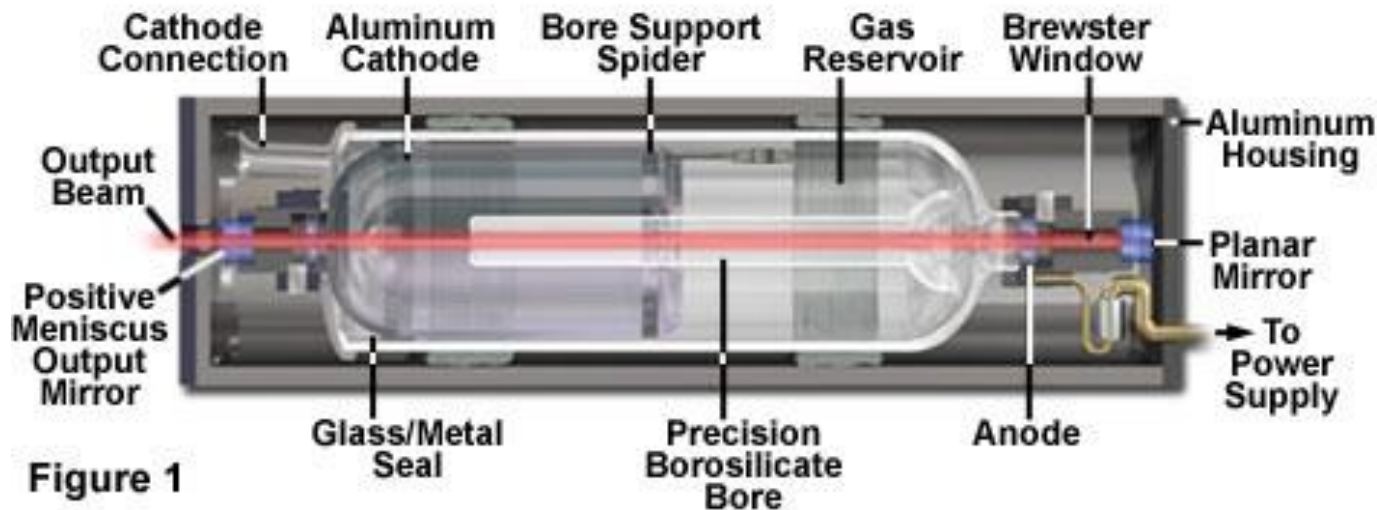
Például: He-Ne lézer $\sim 10^{21}$ molekula/m³

Nd-YAG lézer $\sim 10^{25} - 10^{26}$ Nd-ion/m³

Hélium-neon lézer

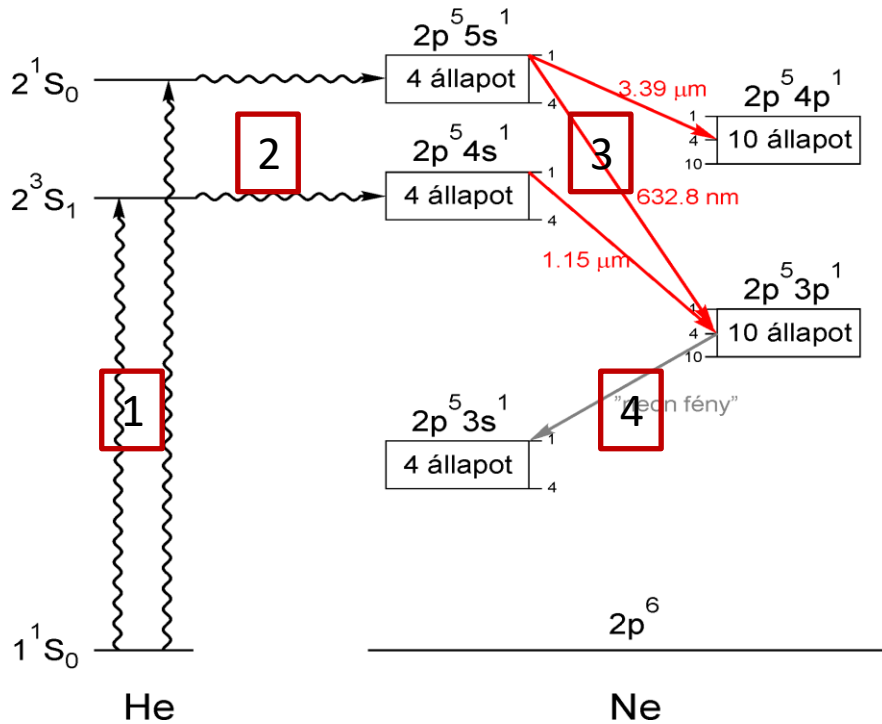


Anatomy of the Helium-Neon Laser



Lézeranyag: ~10:1 arányú He/Ne elegy, össznyomás ~1-2 mbar
A lézerátmenet a Ne atomoktól származik, a He segédanyag

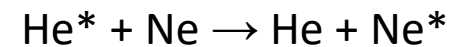
Hélium-neon lézer/2



A lényeg: a Ne atomokat a felső szintre pumpáljuk a közbenső szintek kihagyásával!

1. lépés: a He atom gerjesztése elektron ütközéssel. A He* metastabil (fotonos bomlás valószínűtlen)

2.lépés: a gerjesztési energia átadása a Ne atomnak



Ezt másodfajú ütközésnek is nevezik.

Feltétele: a He* és Ne* energiái egyezzenek

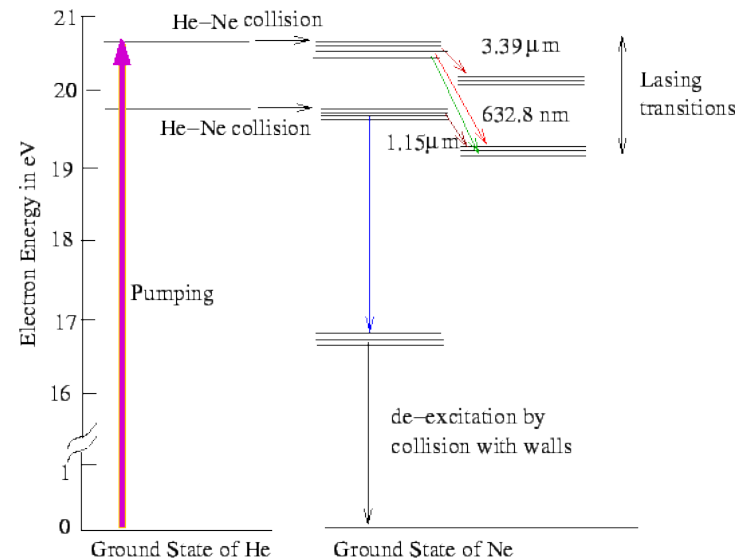
3. lépés: lézertmenet

Populáció inverzió a két szint között $\lambda=633\text{nm}$

4. lépés: az alsó lézerszint gyors kiürülése

Hélium-neon lézer/3

- Kb. egy évszázada ismert volt, hogy a neon kisülési csőbe (ami mindenképpen vörös fényt bocsájt ki) adagolt hélium javítja a cső fényét. Ennek a megértése vezetett el a He-Ne lézerhez.
- Ez a lézertípus terjedt el először a világon az 1960-as évek elején. Az első Magyarországon épített és működő lézer is ilyen volt.
- Megfelelő szelektív tükörrel lehet elérni, hogy 633nm-es vonal erősödjön. Enélkül IR-ben működik.
- Nagy előnye, hogy nemesgázokat tartalmaz, amelyeket a kisülés nem bont el évtizedek alatt sem. Ezért zártan készíthető, nem kell gázcseré.
- Igen rossz hatásfokú. a He $1s2s$ gerjesztett állapota (20,5 eV), a lézer foton energiája ennél éppen egy nagyságrenddel kisebb ($\approx 2,0$ eV). Ez a tény eleve 10% alá viszi a hatásfokot. Számos itt nem részletezett atomfizikai folyamat ennek a töredékére csökkenti az elvi hatásfokot, a gyakorlati hatásfok pedig az 1%-ot sem éri el.
- A He-Ne lézerek általában csak néhány mW teljesítményűek. Ez trükközéssel se nagyon növelhető, ezért használják iskolai lézerként.



Ionlézerek

A lényeg: pozitív ionok esetén a hiányzó elektron miatt az atommag töltése kevésbé van leárnyékolva, ezért a semleges atomokhoz képest az energiaszintek nagyobb távolságra kerülnek egymástól. Ennek következtében az ion lézerek működési tartománya a nagyobb foton energiák felé, a látható és ultraibolya tartományba tolódik át.

Argon(ion)lézer

A lézersugárzás az Ar^+ ionoktól származik! („Argonion”lézer)

Lézer közeg: $\sim 0,5$ torr nyomású Ar-gáz, kisülési csőbe töltve

Kisülésben

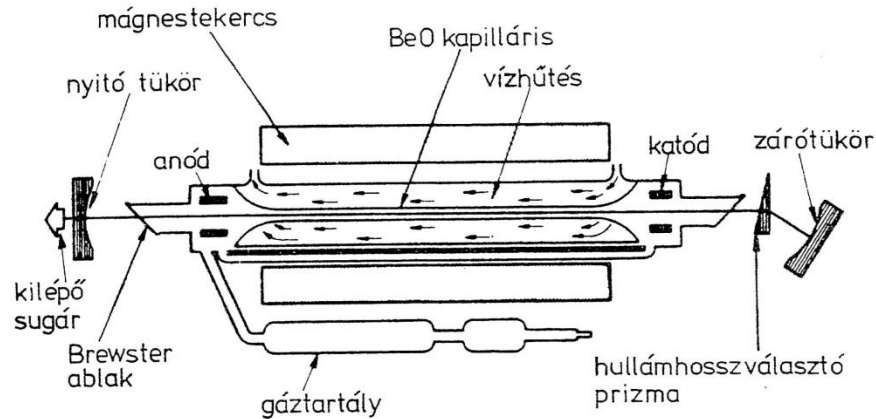
- gerjesztett molekulák
- alapállapotú ionok
- különböző gerj. áll. ionok

} jönnek létre (plazma)

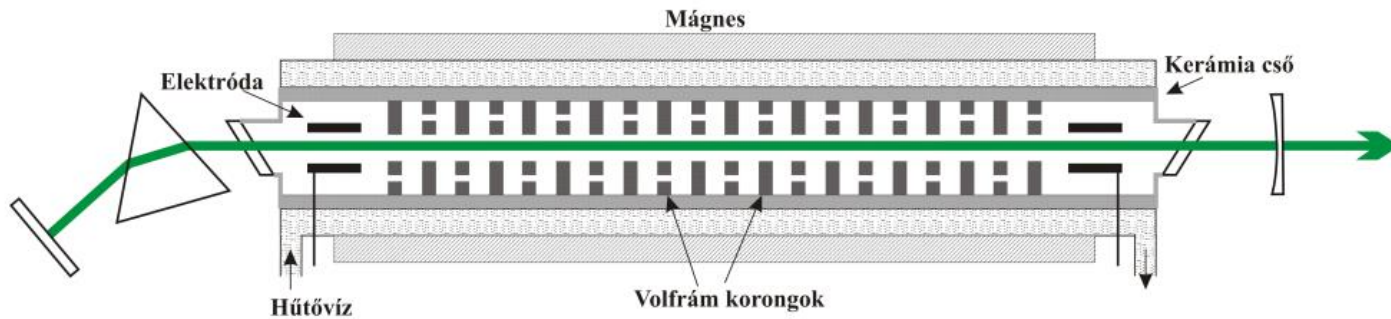
A kisülési cső működési jellemzői: áramerősség, feszültség, nyomás, hőmérséklet - ezektől függ az Ar^+ ionok populációja különböző energiaszinteken.

Inverz populáció érhető el az Ar^+ ion egyes gerjesztett állapotaiban, náluk kisebb energiájú gerjesztett állapotokhoz képest.

Az argon(ion)lézer felépítése

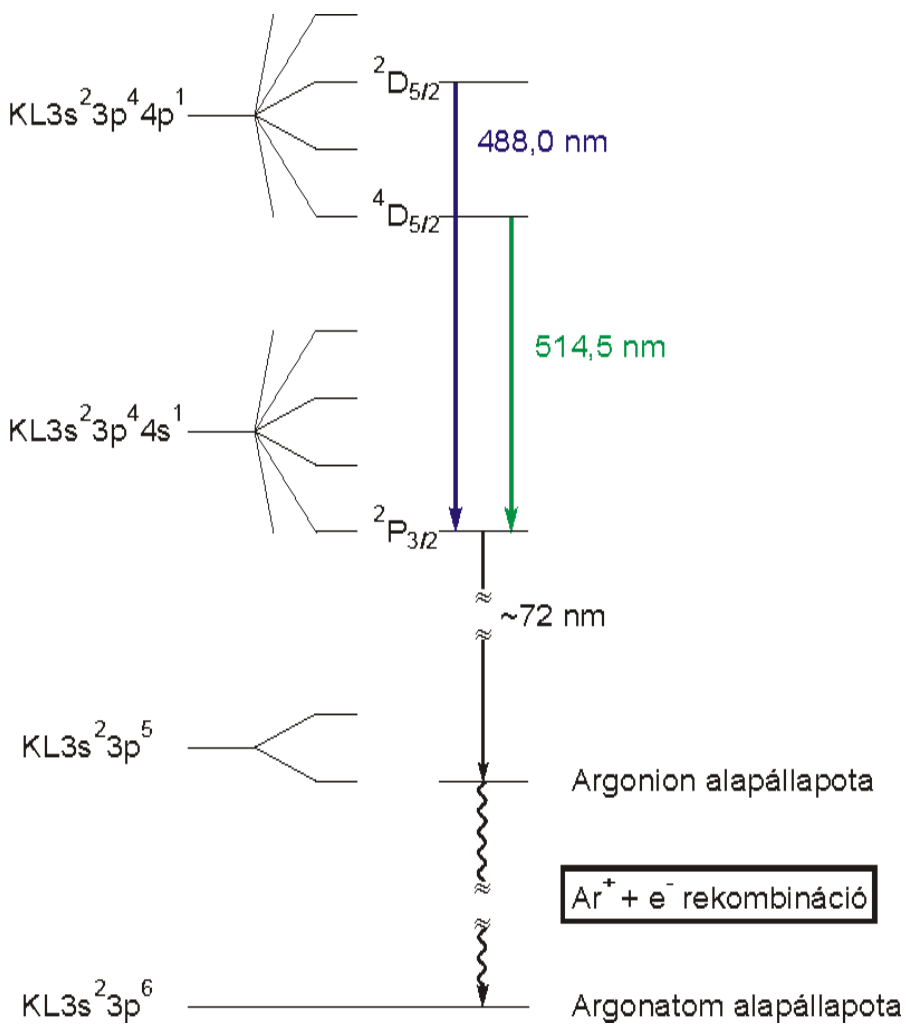


- Nagy áramerősség és hőmérséklet kell ahhoz, hogy a gerjesztett ionállapotok jelentős populációt tartsanak
- Általában sok lézerátmenet kialakul. Közülük, ha szükséges, egy diszperziós elemmel válogathatunk.



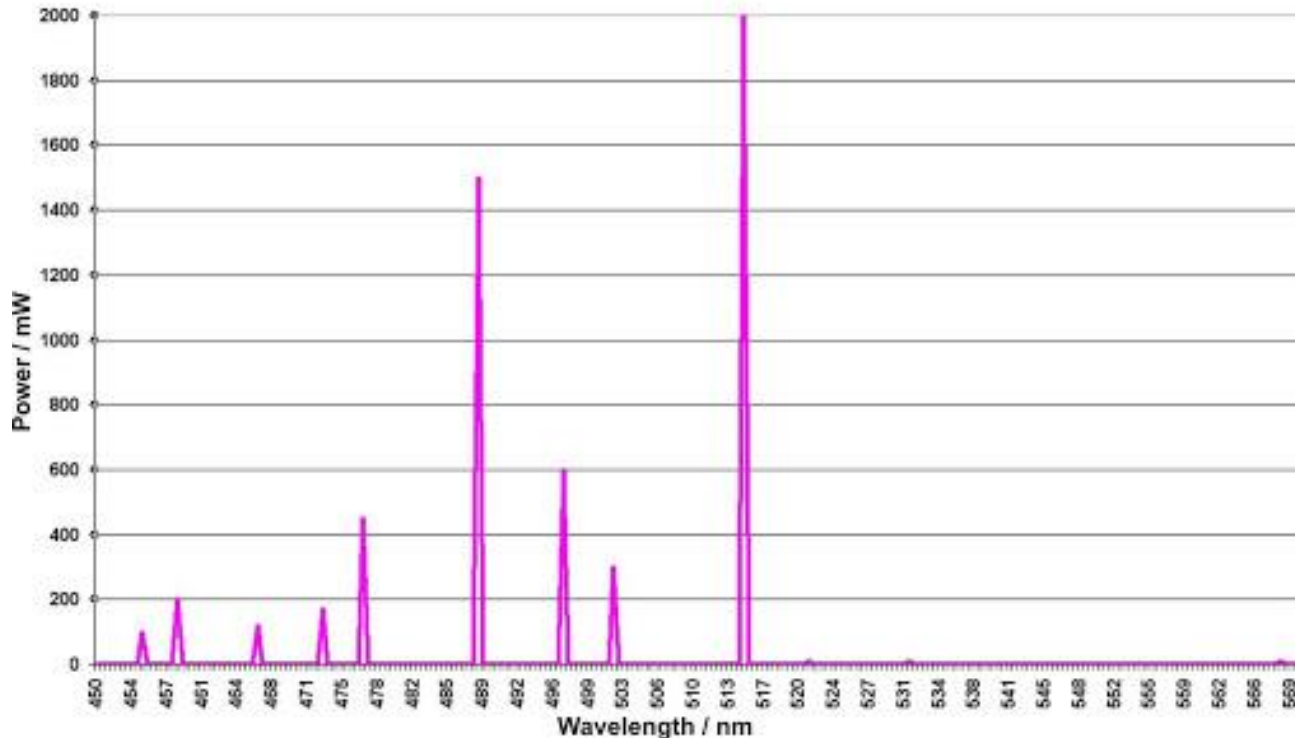
A magas hőmérséklettől a lézercső falát a plazma mágneses térrel történő koncentrációjával lehet valamelyest védeni. A fal ennek ellenére is nagyon felmelegszik, ezért különleges anyagból kell készíteni és erősen kell hűteni.

Az argon(ion)lézer energia diagramja



- Az ionlézerekben a lézernívókat a **gerjesztett ionállapotok** jelentik. Ezek elektronütközéssel történő gerjesztésének hatékonysága és élettartama igen eltérő lehet, és könnyen előfordulhat, hogy egy nagyobb energiájú gerjesztett ionállapotban feldúsul az ionok száma, míg valamelyik alatta lévő szinten lecsökken.
- A legtöbb ionfajta esetében találhatunk ilyen populációinverzióra hajlamos energiaszint kettőst.
- Az argonion szintek valójában – a 3p és a 4s vagy 4p elektronok perdületeinek különböző kapcsolódásai miatt – sok egymáshoz közeli szintet jelentenek.
- A **3p⁴4p** állapotok populációja – atomfizikai okok miatt – általában nagyobb mint a **3p⁴4s** állapotoké, így köztük folyamatosan **populációinverzió** áll fenn.

Az argon(ion)lézer fényének spektruma

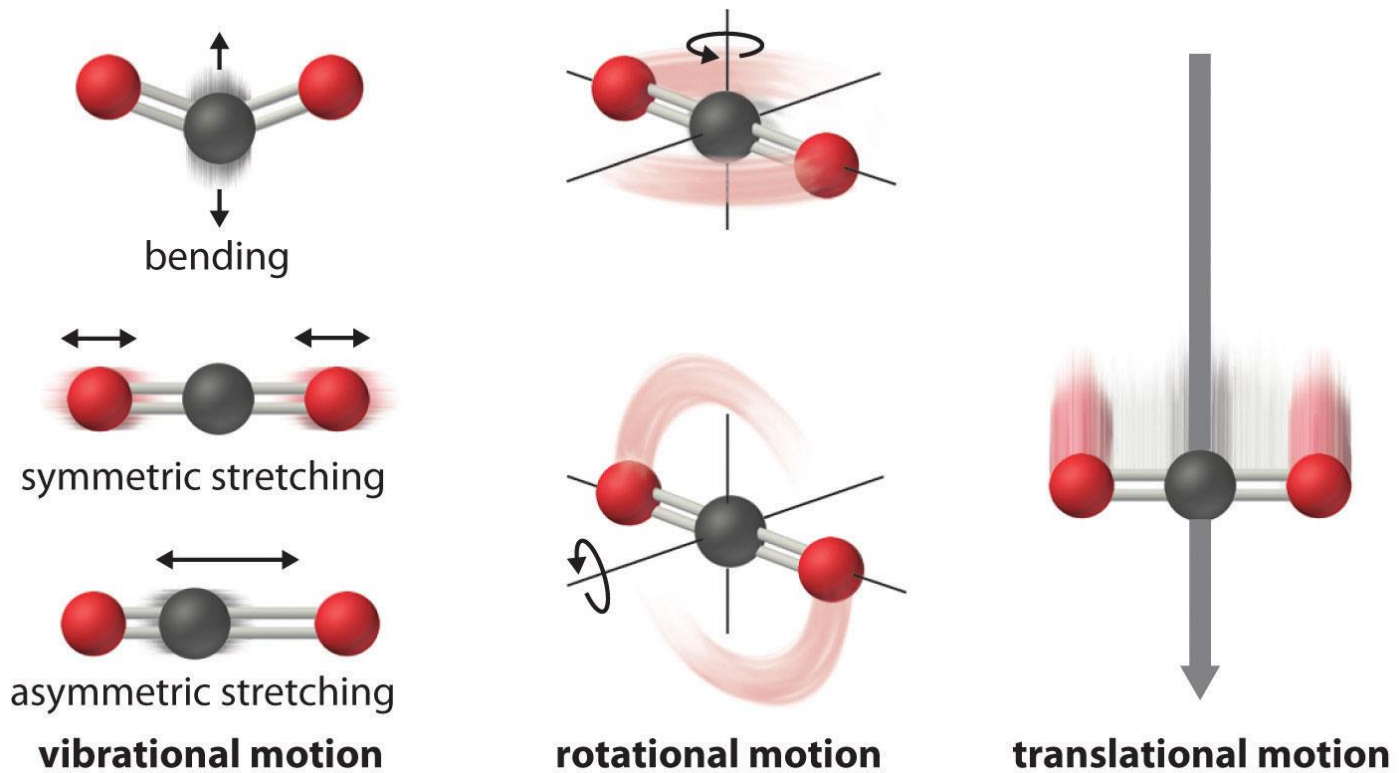


Az argon-ion lézer nagyobb teljesítménnyel a **488 nm-es (kék)** és az **514,5 nm-es (zöld)** hullámhosszakon tud működni. Vannak más, kisebb teljesítményű hullámhosszai is (pl. 457,9 nm (ibolya)). Ezek külön-külön és együttesen is működhetnek, ez utóbbi esetben az **argon-ion lézer fénye kékesfehér**.
Ez a legjobb egyszerre több színben sugárzó lézer

A molekuláris lézerek

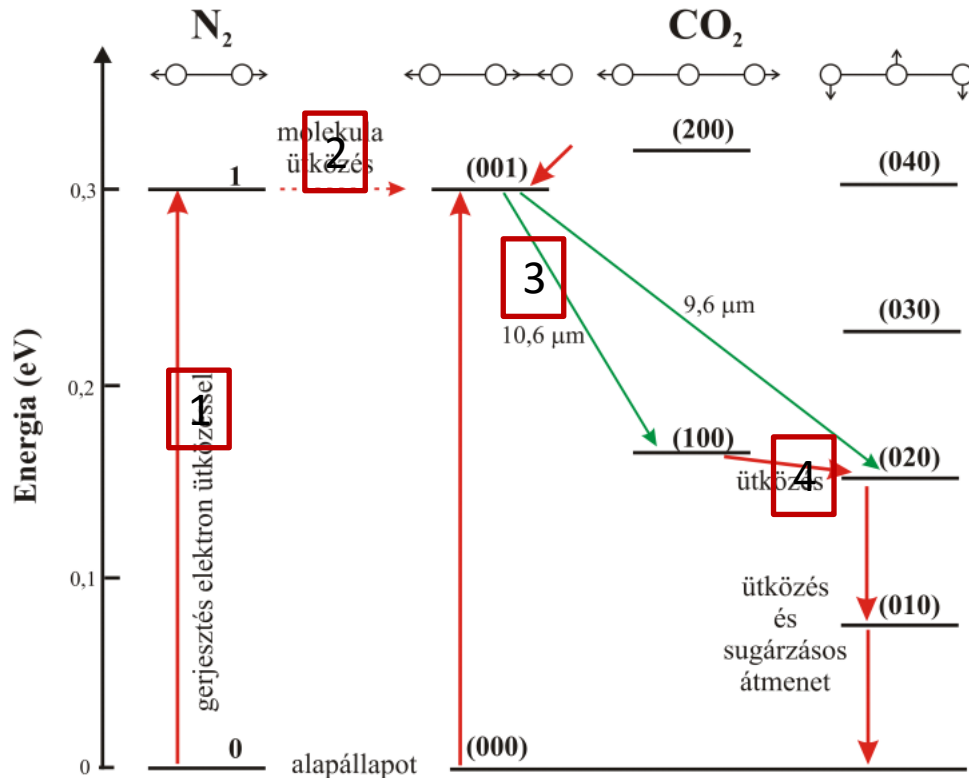
- A molekuláris lézerekben a gerjesztés nem az atomi héjakon, hanem az ennél sokkal kisebb molekuláris energiaszinteken történik.
- Ezek az energiaszintek a molekulák forgásából (rotációs energiaszintek) és rezgéséből (vibrációs energiaszintek) származnak.
- A vibrációs szintek tipikusan néhány tized eV-nyi energiával gerjeszthetők, a rotációs szintek ennek századával.
- A rotációs szintek tehát igen közel vannak egymáshoz, ezeket az energiákat gyakran folytonosnak tekintjük és sávós energiaszerkezetről beszélünk.
- A hőmozgás energiája szobahőmérsékleten sokkal nagyobb a rotációs szintek különbségénél, de kisebb, mint a vibrációs szintek energiája. Tehát mondhatjuk, hogy szobahőmérsékleten a molekulák forognak, de még nem (vagy alig) rezegnek

A CO₂ molekula lehetséges mozgásai



Szobahőmérsékleten a 3 irányú transzláció mellett a 2 irányú forgás is zajlik, azaz a CO₂ molekulának 5 szabadsági foka van. Illetve éledezik egy hatodik is: **a torziós rezgés**. A másik két rezgési módushoz (a **szimmetrikushoz** és az **aszimmetrikushoz**) ennél egy kicsivel nagyobb energia tartozik.

A CO₂ lézer



A lényeg: a CO₂ molekulákat a felső szintre pumpáljuk a közbenső szintek kihagyásával!

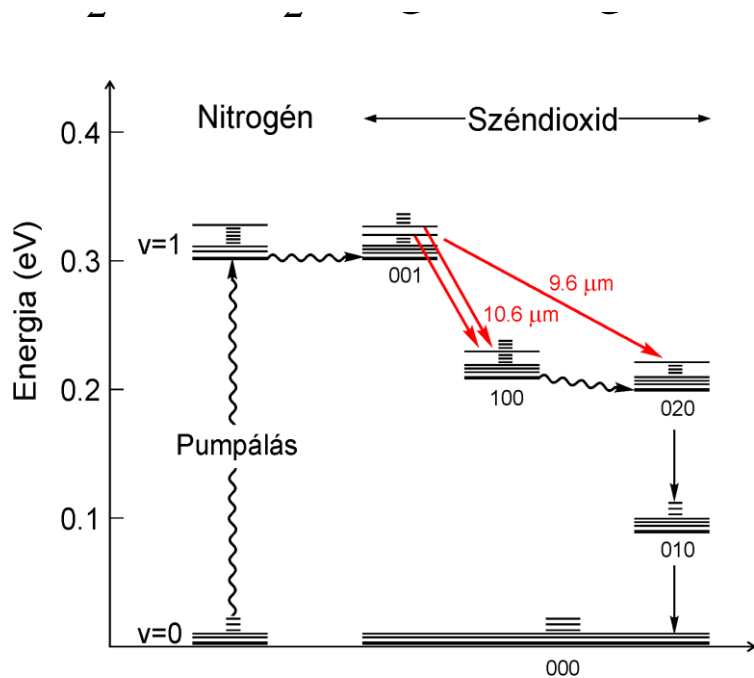
1. lépés: a N₂ molekula gerjesztése elektron ütközéssel. A N₂* fotonos bomlása valószínűtlen

2. lépés: a gerjesztési energia átadása a CO₂ molekulának
 $N_2^* + CO_2 \rightarrow N_2 + CO_2^*$
 Feltétel: a N₂* és CO₂* energiái egyezzenek

3. lépés: lézertmenet
 Populáció inverzió a két szint között $\lambda=10,6\mu\text{m}$

4. lépés: az alsó lézerszint gyors kiürülése

A CO₂ lézer/2



- Valójában a vibrációs szintekre szuperponálódnak a rotációs szintek. Ez szükséges a a N₂* és CO₂* energiák egyezéséhez.
- Szobahőmérsékleten a termikus gerjesztés max. a 010 szintet képes elérni.
- Ennek így kell maradnia a működés közben is, tehát a CO₂ lézer igen intenzív hűtést igényel.
- A foton energiája kb. a gerjesztési energia 1/3 része, ez igen magas kvantumhatásfok.
- Az egyéb veszteségek is kicsik, így nagyon jó a hatásfok és nagy a teljesítmény. Ez az egyik legnagyobb teljesítményű lézertípus.

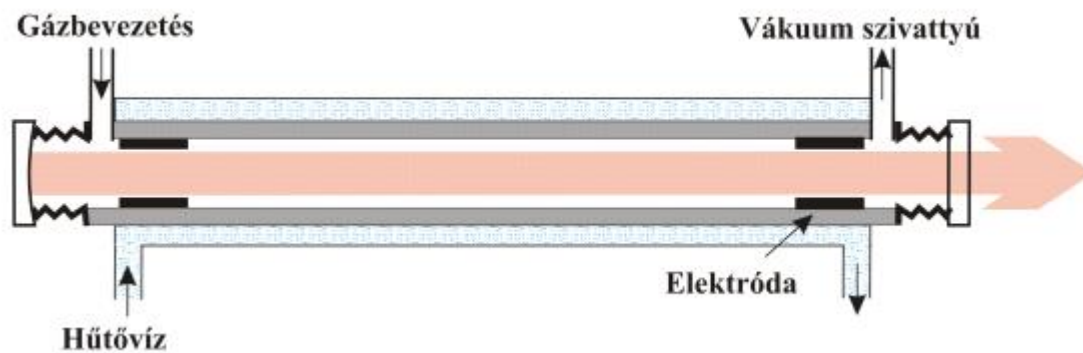
A CO₂ lézer felépítése

Az első CO₂ lézerek nyitott gázrendszerrel működtek, folyamatos longitudinális gáz-áramoltatással és longitudinális gerjesztéssel.

Az ilyen lézerelrendezés napjainkban is a hobbi lézerkészítők egyik kedvelt típusa.

A későbbiekben a CO felhalmozódását sikerült kiküszöbölni kis mennyiségű (~1%) vízgőznek a gázkeverékhez adásával. Ezzel lehetővé vált hosszú élettartamú zárt rendszerű, könnyen kezelhető lézerek kialakítására.

Az ilyen, zárt rendszerű CW lézerek maximális teljesítménye 100 W körüli.

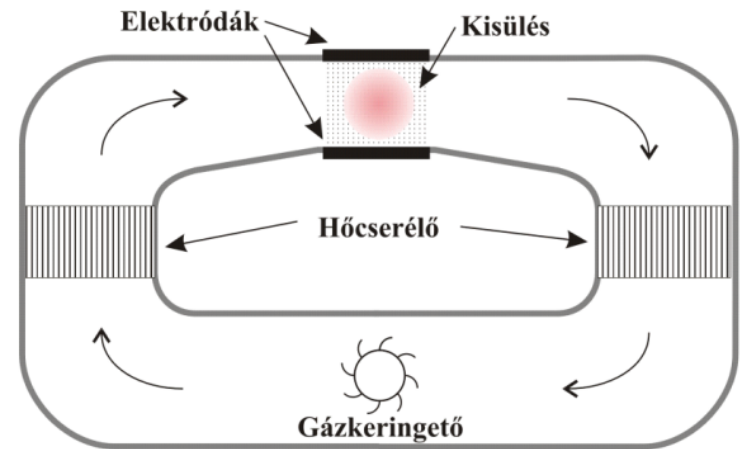


Longitudinális áramoltatású és gerjesztésű CO₂ lézer felépítése.

A longitudinális áramlási sebesség jelentős növelésével (~50 m/s) és transzverzális gerjesztés alkalmazásával kilowattos CW teljesítmény érhető el.

A CO₂ lézer felépítése/2

A **transzverzális gázáramoltatás** lehetővé teszi nagyobb gáznyomás (100 mbar) és nagyobb pumpáló áramerősség alkalmazását és többször **10 kW-os** teljesítményű lézerek megépítését.



A transzverzális gerjesztésű, atmoszférikushoz közeli nyomáson üzemelő **TEA CO₂ lézer impulzus üzemmódú**. A gázt elő-ionizálják, a gerjesztést pedig egy kondenzátor kisütésével valósítják meg. Átlagteljesítménye ~500 W, ismétlési frekvenciája ~50 Hz, az impulzushossz ~100 ns, míg a csúcsteljesítmény MW körüli.

A CO₂ lézerek legnagyobb teljesítményű változata **gáz-dinamikus pumpálási elven** működik. A működéshez szükséges nagy nyomású (~10 bar) és magas hőmérsékletű (~1000 °C) CO₂-t megfelelő üzemanyag elégetéséből nyerik. A magas hőmérséklet miatt megnő a gerjesztett állapotok betöltöttsége, majd az **egy fúvókán áthaladó és adiabatikus kitágulást szenvedő gázban megindul a relaxáció**. Mivel az alsóbb gerjesztett állapotok élettartama kisebb, az alsó energiaszint hamarabb kiürül, mint a felette levők és **kialakul a populáció inverzió**. Az ilyen lézerrel elérhető **100 kW folytonos lézerteljesítmény**.

Ellenőrző kérdések

Melyik állítás jellemző a He-Ne lézerre? (Három választ kell megjelölni!)

- a) működése közben a neon atomok két energiaszintje között populáció inverzió áll fenn
- b) az egyik legnagyobb teljesítményű lézertípus
- c) a gerjesztési energia átadása a két gáz között másodfajú ütközéssel történik
- d) három energiaszintű lézer
- e) az első Magyarországon működő lézer ilyen volt
- f) gerjesztése félvezető lézerrel történik

Megoldás: a), c), e)

Állítsuk növekvő kvantumenergiák szerinti sorba a bemutatott 3-féle gázlézert!

- a) argonion lézer, He-Ne lézer, CO₂ lézer
- b) He-Ne lézer, CO₂ lézer, argonion lézer
- c) CO₂ lézer, argonion lézer, He-Ne lézer
- d) CO₂ lézer, He-Ne lézer, argonion lézer