

Az Információtechnika fizikai alapjai (GEFIT003M, GEFIT006M)

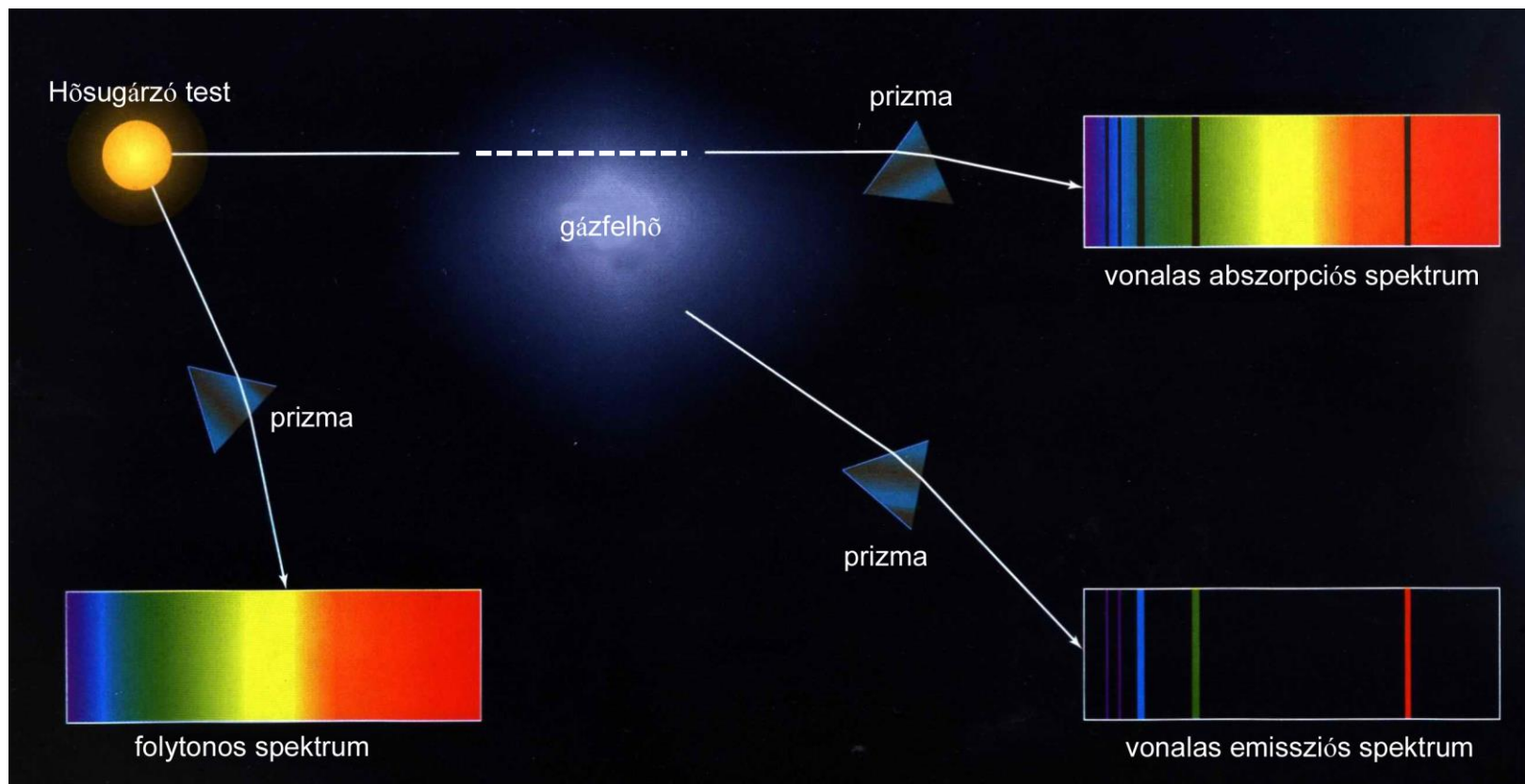
2020/2021. tanév, 2. félév

4. rész: Kvantumoptika és kvantumelektronika, a lézerek.

4/1 előadás: A lézerek működési elve, indukált emisszió, populációinverzió, tükrörezonátor. A gázlézerek.

Gázok emissziós és abszorpciós színe (ism.)

Szilárd testet folytonos spektrumú hősugárzásával ellentétben atomos gázok vagy gőzök csak bizonyos frekvencián sugároznak (emisszió), illetve bizonyos frekvenciájú sugárzást elnyelnek (abszorpció).



A színek vonalai egyfajta ujjlenyomatként használhatók és segítségével távoli testek anyagának összetétele határozható meg.

Gázok színekének magyarázata - Bohr-posztulátumok (ism.)

A jól meghatározott frekvenciájú kisugárzott, illetve elnyelt fotonokból arra lehet következtetni, hogy az atomokban csak bizonyos nagyságú energia átmenetek lehetségesek.

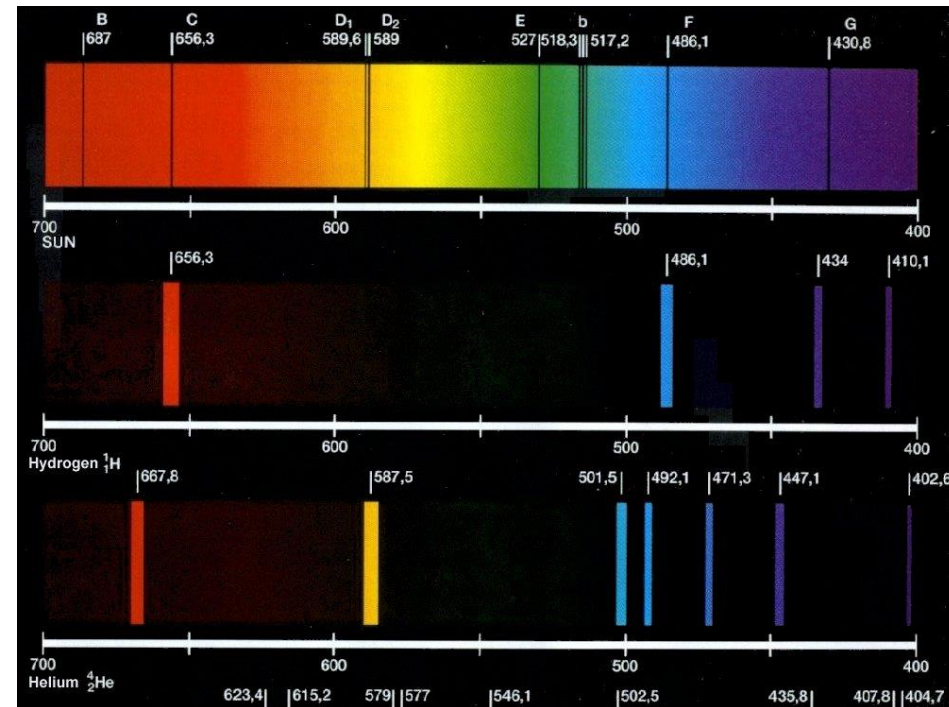
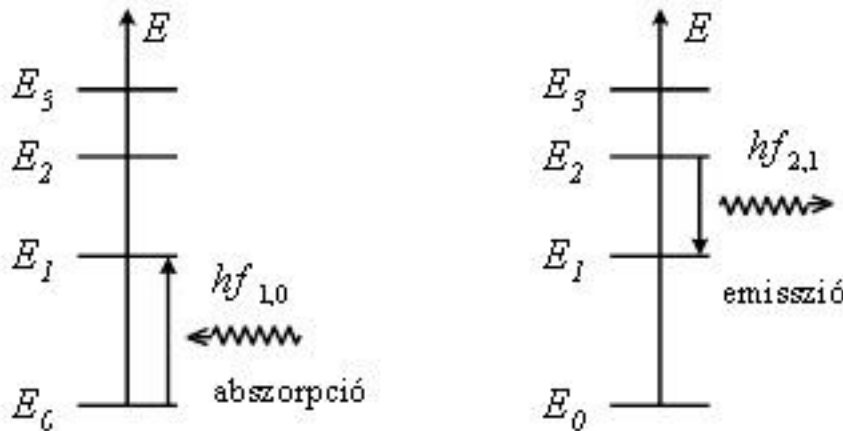
Bohr-posztulátumok:

- Az atomokban az elektronok csak diszkrét energiaszinteken $E_1, E_2, \dots, E_i$ tartózkodhatnak és ezeken a stacionárius pályákon nem sugároznak.
- Az atomok csak akkor sugároznak (emisszió) ha az elektron egy magasabb energiájú pályáról egy alacsonyabbra kerül.

Az emisszió fordítottja az abszorpció.

Bohr-féle frekvencia feltétel:

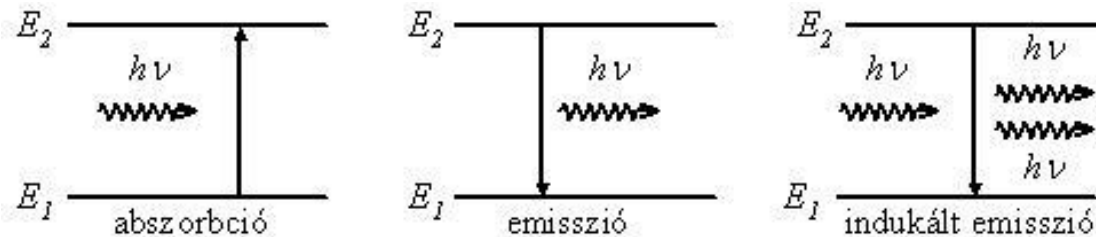
$$E_i - E_j = hf_{ij}$$



Az indukált emisszió

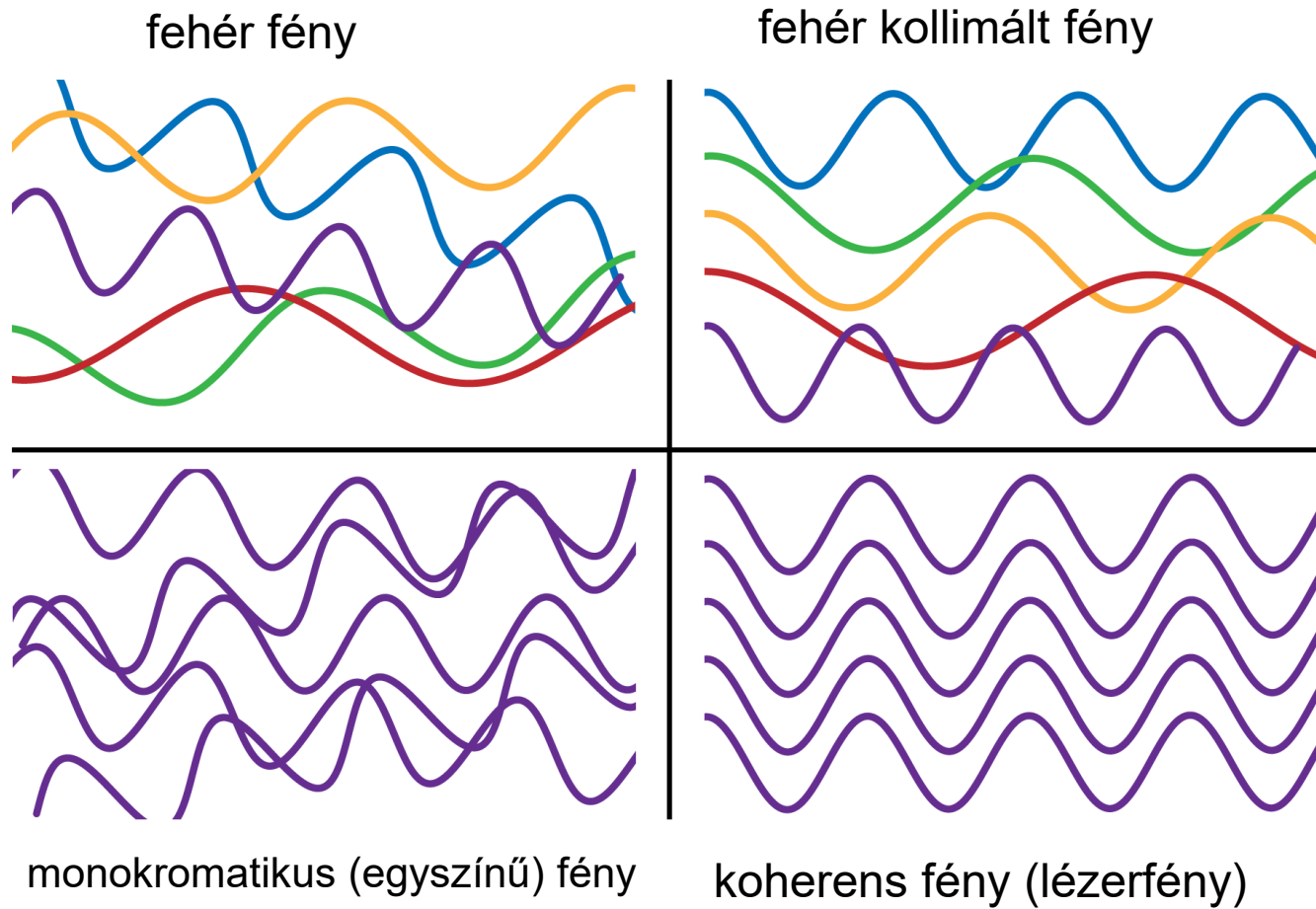
Einstein jött rá először arra, hogy a fentebb vázolt **abszorpció** és **emisszió** mellett kell léteznie egy harmadik elemi atomi folyamatnak, **ami indukált emisszió**nak nevezünk. A folyamat során a gerjesztett atomot olyan frekvenciájú foton éri el, amelyet ő maga is ki tudna bocsátani. A bejövő foton hatására ez a kibocsátás meg is történik, miközben az atom gerjesztettsége megszűnik. A beérkező (az atom mellett elhaladó) foton tehát egy második foton emisszióját indukálja.

A második foton az eredetivel megegyező frekvenciájú, vele azonos irányban halad, fázisuk azonos. Az ilyen tulajdonságú fotonok **koherensek**.



A középső folyamatot a továbbiakban **spontán emisszió**nak nevezzük. Ez a folyamat tehát csupán az atom energiaminimumra törekvése miatt, magától, minden külső körülménytől függetlenül bekövetkezik, de nem azonnal. A folyamat időigénye a gerjesztett állapot élettartama. Ezzel szemben az indukált emisszió időkésés nélkül, azonnal bekövetkezik.

Igen fontos hangsúlyozni, hogy az indukált foton és az eredeti foton **koherens**, azaz egyezik a frekvenciájuk, az irányuk, a fázisuk (sőt a polarizációjuk is).



Az Einstein-együtthatók

Az abszorpció során pontosan annyi atom kerül gerjesztett állapotba, mint amennyi foton elnyelődik. Az időegység alatt elnyelt fotonok száma (N_{foton}^{abs}) nyilvánvalóan arányos a beérkező (megfelelő frekvenciájú) fény $I(f)$ intenzitásával és az alapállapotú atomok N_1 számával.

A folyamat során az alapállapotú atomok száma csökken, ezért ΔN_1^a előjele negatív:

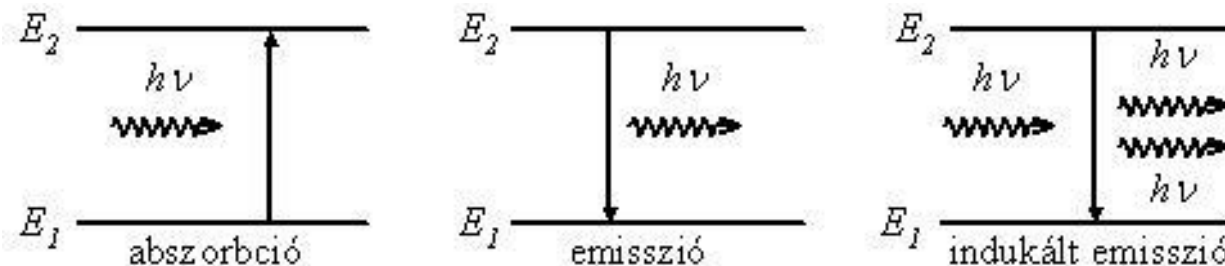
$$N_{foton}^{abs} = -\Delta N_1^a = B_{12} N_1 I(f)$$

A B_{12} állandó jellemző az atomra, az abszorpció Einstein-féle valószínűségi tényezője.

A spontán emisszió nem függ külső körülményektől, tehát a száma csak a gerjesztett állapotú atomok N_2 számától függ. Minden spontán emittált foton eggyel növeli az alapállapotú atomok számát, mert közben az atom gerjesztettsége megszűnik. Időegység alatt tehát:

$$N_{foton}^{sp.em} = \Delta N_1^{sp} = A_{21} N_2$$

Az A_{21} mennyiség a spontán emisszió Einstein-féle tényezője.

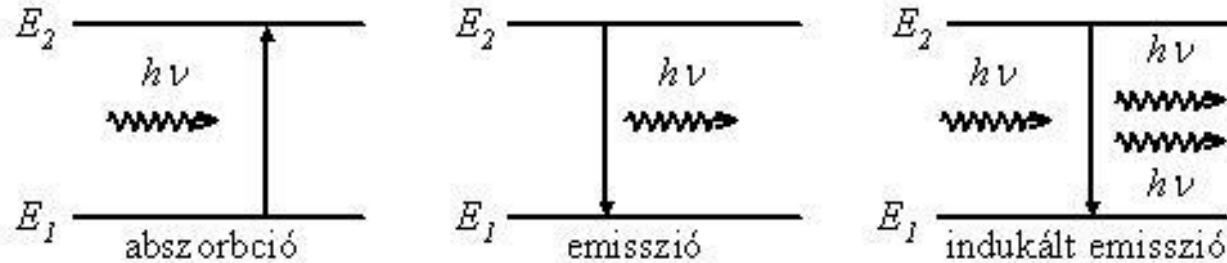


Az Einstein-együtthatók/2

Az indukált emisszió valószínűsége függ a beérkező (megfelelő frekvenciájú) fény $I(f)$ intenzitásától és a gerjesztett állapotú atomok N_2 számától. Az alapállapotú atomok száma az indukált emisszió során is nyilvánvalóan növekszik: .

$$N_{\text{foton}}^{\text{ind.em}} = \Delta N_1^{\text{is}} = B_{21} N_2 I(f)$$

A B_{21} atomi állandó az indukált emisszió Einstein-féle valószínűségi tényezője.



Az üregbe zárt, termikus egyensúlyba került atomokra teljesül, hogy mind az alap-, mind a gerjesztett állapotú atomok száma állandó:

$$\begin{aligned} \Delta N_1 &= \Delta N_1^a + \Delta N_1^{sp} + \Delta N_1^{is} = 0 \\ -B_{12} N_1 I(f) + A_{21} N_2 + B_{21} N_2 I(f) &= 0 \end{aligned} \quad (*)$$

A Maxwell-Boltzmann energiaeoszlás

Hőmérsékleti egyensúlyban az energiaszinteken az elektronokra jó közelítéssel érvényes a Maxwell-Boltzmann (MB) energiaeoszlás.

$$N_i = N_0 e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

(Az elektronokra valójában a Fermi-Dirac-statisztika használandó, de $hf \gg kT$ esetén a MB -statisztika is jó közelítés.)

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{\frac{hf}{kT}}$$

mivel $E_2 - E_1 = hf$ (Bohr-féle frekvencia feltétel)

Behelyettesítve a (*) egyenletbe és átrendezve

$$A_{21} = I(f) \left(B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21} \right) \quad \frac{A_{21}}{B_{21}} = I(f) \left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)$$

$$I(f) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)}$$

Összevetés a Planck-törvénnyel

$$I(f) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\left(\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{\frac{hf}{kT}} - 1\right)} \quad \text{Hasonlítsuk össze az Einstein és a Planck által levezetett formulákat!} \quad I(f) = \frac{Khf^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

1, $\frac{A_{21}}{B_{21}} = Khf^3$, azaz a spontán és indukált emisszió valószínűségi tényezőinek az aránya a frekvencia köbével arányos. **Az indukált emisszió tehát inkább a kisebb frekvenciákra jellemző** (ezért nehéz az optikai tartományban indukált emisszióval erősíteni, először MASER volt!)

$$\frac{N_{\text{foton}}^{\text{sp. em}}}{N_{\text{foton}}^{\text{ind. em}}} = \frac{A_{21} \cdot N_2}{B_{21} \cdot N_2 I(f)} = \frac{Khf^3}{I(f)}$$

Látható, hogy bármilyen f frekvencián létezik egy $I(f)$ intenzitás, amelynél a kétféle módon kibocsátott fotonok száma megegyezik. Ennél kisebb intenzitásnál mindig a spontán emisszió, fölötté az indukált emisszió dominál. Ez a kritikus intenzitás azonban a frekvencia köbével arányos.

2, $B_{12} = B_{21}$ ($= B$) azaz az **abszorpció és a spontán emisszió Einstein féle valószínűségi tényezője megegyezik**. Tehát egy alapállapotú atom pontosan ugyanakkora valószínűséggel abszorbeál egy fotont, mint amekkora valószínűséggel kényszerít indukált emisszióra egy gerjesztett atomot egy foton.

Erősítés indukált emisszióval

Tekintsük most az emittált és abszorbeált fotonok számának arányát!

$$\frac{N_{\text{foton}}^{\text{sp.em}} + N_{\text{foton}}^{\text{ind.em}}}{N_{\text{foton}}^{\text{abs}}} = \frac{A_{21}N_2 + BN_2I(f)}{BN_1I(f)} \rightarrow \frac{BN_2I(f)}{BN_1I(f)} = \frac{N_2}{N_1}$$

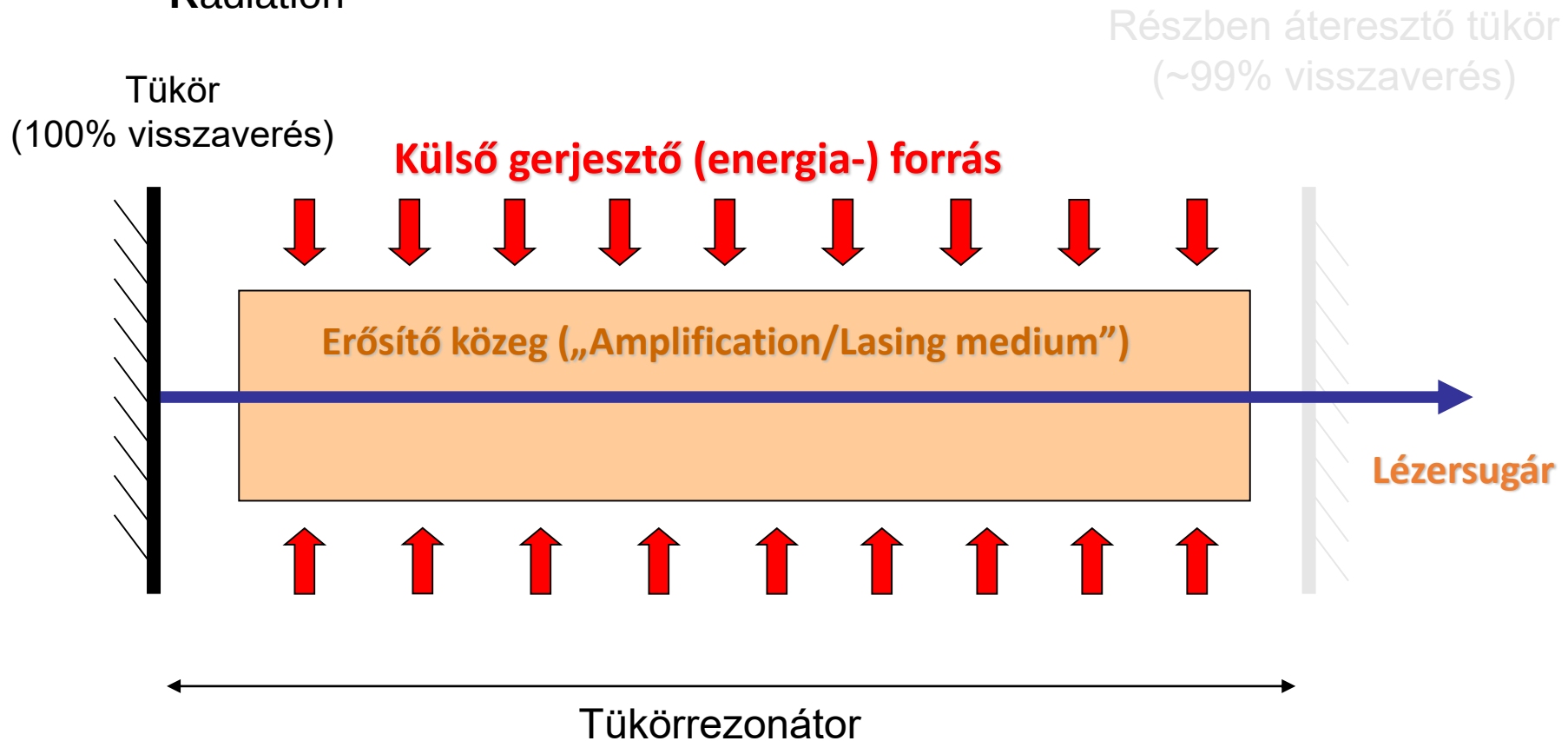
Van olyan nagy fényintenzitás, amelynél a spontán emisszióval már nem kell számolni. Akkor ez a **hányados** egyszerűsödik és végeredményben **a gerjesztett és az alapállapotú atomok számának az arányához tart.** Ha tehát több az alapállapotú atom, mint a gerjesztett, akkor több az abszorpció, mint az emisszió. A fotonok száma fogy, a sugárzás **elnyelődik** az anyagban. Ha a gerjesztett atomok száma nagyobb, akkor az emisszió meghaladja az abszorpciót, a sugárzás az anyagban **erősödik**.

Hőmérsékleti egyensúlyban közelítőleg érvényes a Boltzmann-eloszlás, tehát alapállapotban mindig több atom található ($N_1 > N_2$). Ebben az állapotban – amit **normál populációnak** nevezhetünk – tehát dominál az abszorpció, **a fény az anyagban elnyelődik**.

Ha a helyzet fordított, azaz **a gerjesztett állapotú atomok vannak többségben** ($N_1 < N_2$), akkor viszont az anyagba belépő **sugárzás erősödik**. Ilyet a hétköznapi életben nem szoktunk tapasztalni, ez a fordított állapot „magától” nem szokott bekövetkezni. Nagyon különleges anyagokban különleges körülmények között azonban megvalósíthatjuk ezt a fordított populációt, amit szokás **populációinverzió**nak is nevezni. A populációinverzió tehát a sugárzás közegbeli erősödésének alapvető feltétele.

Light
Amplification by
Stimulated
Emission of
Radiation

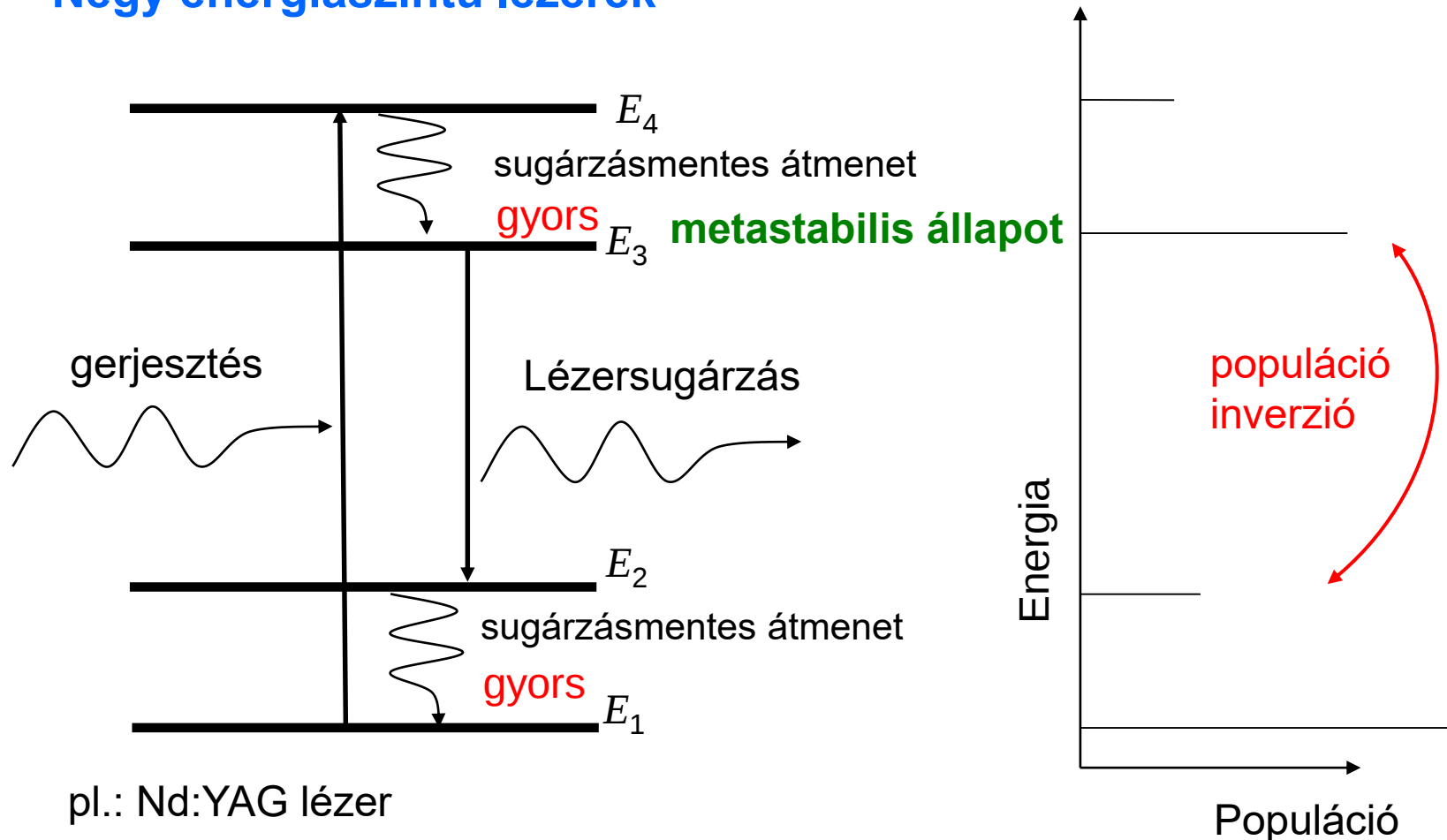
fényerősítés a sugárzás
indukált (stimulált)
emissziója által



Populáció inverzió megvalósítása

Lényeg: a lézerátmenet két szintje között kell inverz populációnak lennie, a többi szint populációja lényegtelen. Populáció inverzió nem jön létre csak „úgy”, ahhoz trükközni kell!!!

Négy energiaszintű lézerek



Ellenőrző kérdések

Melyik állítás nem jellemző az indukált emisszióra?

- A) populációinverzió esetén gyakoribb, mint az abszorpció
- B) létezésére először Einstein következtetett
- ☒ C) nagyobb frekvenciákon könnyebben legyőzi a spontán emissziót
- D) az indukáló és az indukált fotonok koherensek
- E) az indukáló és az indukált fotonoknak egyezik a frekvenciája

Melyik állítás nem jellemzi a populációinverziót?

- A) magasabb energiaszinten több elektron van, mint az alacsonyabb szinten
- B) termikus egyensúlyban nem fordulhat elő
- ☒ C) ilyenkor az indukált emisszió Einstein féle valószínűségi tényezője nagyobb, mint az abszorpcióé
- D) az indukált emisszió gyakoribb, mint az abszorpció

Az erősítés folyamata

A fény a közegben akkor erősödik, ha az emissziók száma meghaladja az abszorpciókét, azaz a nettó emisszió pozitív:

$$\Delta N_{\text{foton}} = N_{\text{foton}}^{\text{ind.em}} - N_{\text{foton}}^{\text{absz}} = B_{21}N_2I(f) - B_{12}N_1I(f) = B \cdot I(f)(N_2 - N_1)$$

A fotonok száma arányos a fény intenzitásával. A fotonszám (vagy fényintenzitás) növekedését Δt időtartamra vagy az ez alatt a fény által megtett Δx útra is vonatkoztathatjuk. A fényintenzitás egységnyi úton történő növekedése tehát arányos a fény intenzitása mellett a gerjesztett és alapállapotbeli atomok számának a különbségével:

$$\frac{\Delta I}{\Delta x} = C \cdot I \cdot (N_2 - N_1)$$

A differenciák differenciálokra történő átírása és az átrendezés után kapott differenciálegyenlet:

$$\frac{dI}{I} = C \cdot (N_2 - N_1) \cdot dx$$

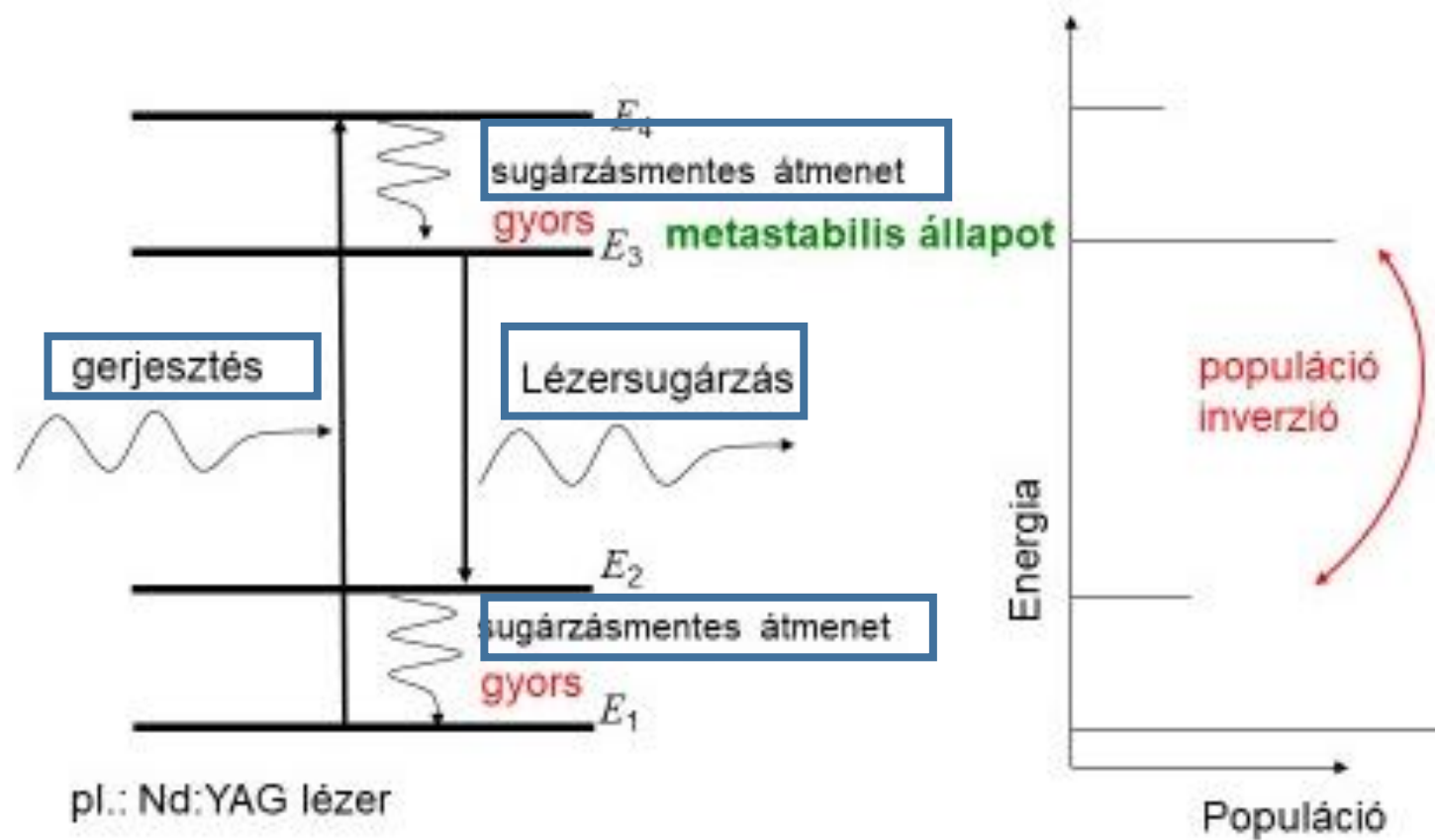
A differenciálegyenlet megoldása exponenciális függvény lesz, tehát a lézer anyagában megtett útja függvényében a sugárzás exponenciálisan erősödik:

$$I = I_0 e^{C(N_2 - N_1)x}$$

(Az erősödés természetesen csak $N_2 > N_1$ esetére (populációinverzió) igaz, $N_2 < N_1$ esetén (normál populáció) a sugárzás a közegben exponenciálisan gyengül.)

Az exponenciális erősödés nem tart a végtelenségig, nagy intenzitásoknál az indukált emisszió lecsökkenti N_2 -t. Ez a csökkenés határesetben N_1 -ig tarthat, ekkor az indukált emisszió egyensúlyba kerül az abszorpcióval, a sugárzás nem erősödik tovább.

Négy energiaszintű lézerek

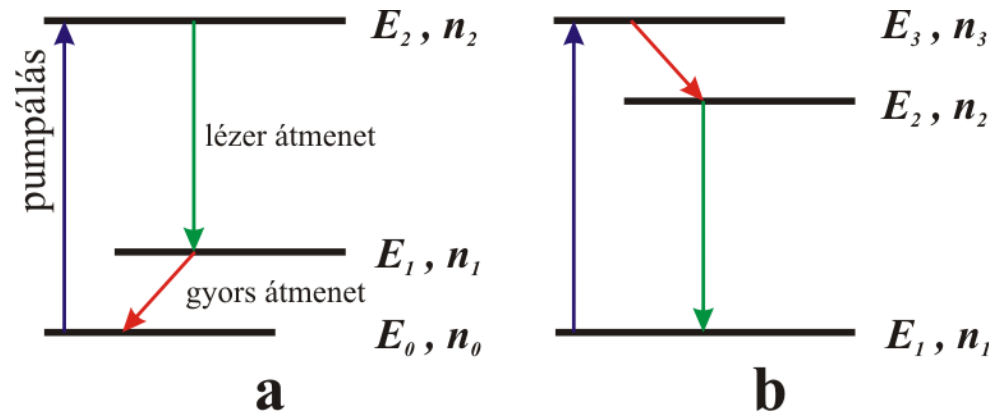


Lézerműködés négy lépésben:

- 1, gerjesztés (alapállapotból a legfelső szintre)
- 2, sugárzásmentes átmenet a felső lézerszintre
- 3, lézerátmenet (populáció inverzió)
- 4, az alsó lézerszint gyors kiürülése

Három energiaszintű lézerek

A négy energiaszintű lézerek a gyakoriak, de három szinttel is működhet a dolog. Ilyenkor vagy a két felső szint esik egybe (a gerjesztő lézer közvetlenül a felső lézerszintet táplálja, vagy a két alsó szint (tehát az alsó lézerszint az alapállapot) (pl. rubinlézer)).



Két energiaszintű lézer nem létezik

A két energiaszint különbségének megfelelő fotonok nem tudnak tartós populáció inverziót létrehozni, legfeljebb telítésbe vihetik az abszorbcíót ($N_2 = N_1$). Ezt követően az abszorbcíó és az indukált emisszió egyensúlyt tart, vagyis se nettó erősítés, se abszorbcíó sincs.

De igen rövid impulzussal mégis lehet populáció inverziót csinálni két szint esetén is!

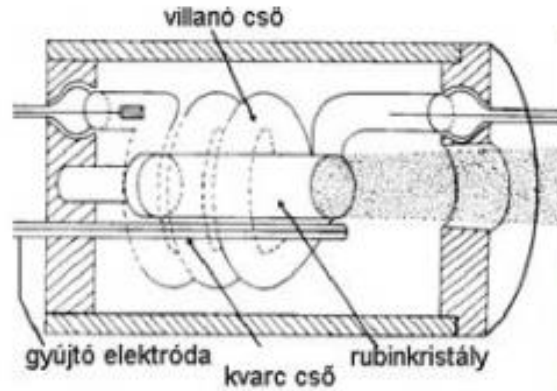
A gerjesztés módjai: 1, gerjesztés fénnnyel

Ha a **lézeranyag** – amelyben tehát a populációinverzió megvalósul és ezáltal a fény indukált emisszió révén erősödik – **szilárd fázisú**, akkor a gerjesztési energiát általában **fény formájában** visszük be a közegbe. Az (1) lépés tehát a fény abszorpciója, amelynek során a foton teljes energiája átadódik az atomnak. A foton energiájának tehát pontosan meg kell egyeznie az (1) lépés felső és alsó energia szintjeinek különbségeivel. A gerjesztés akkor hatékony, ha a fotonok zöme megfelelő energiájú. Tehát például fehér fény esetén a felső nivónak nagyon szélesnek kell lennie. Ha a felső nivó keskeny, akkor viszont közel monokromatikus fényt kell gerjesztéshez használni.

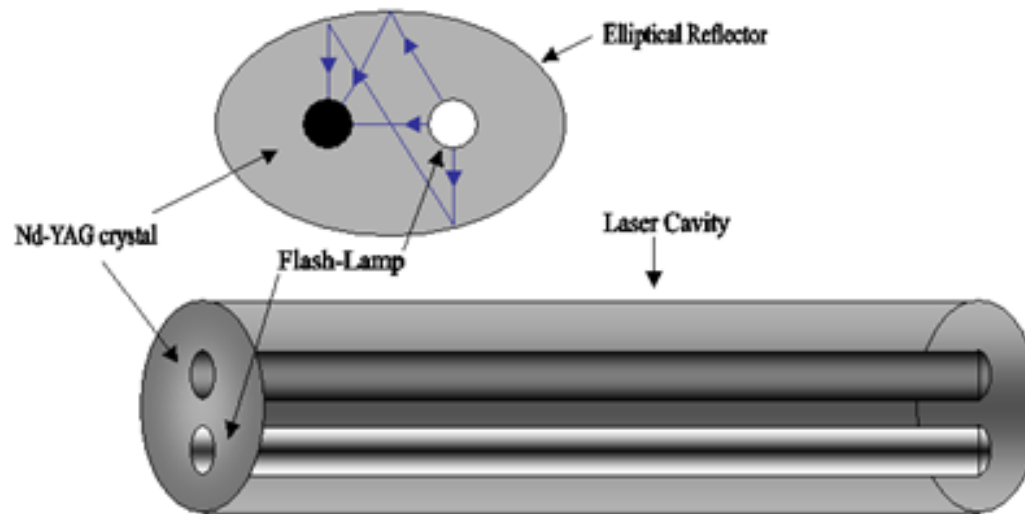
Az első lézerekben a populáció inverziót még nem tudták folyamatosan fenntartani, a fényt **villanólámpa** (xenonlámpa) szolgáltatatta. Folyamatos működésű (CW = continuous wave) lézereket természetesen **folytonos fénnnyel** kell táplálni. Ez ma leginkább LED-del vagy egy másik lézerrel (félvezető lézerrel) lehetséges.

Geometriailag a lámpa **csavarvonalyszerűen** is körbeveheti a lézeranyagot. Az első működő lézerben, amely rubinlézer volt (Maiman, 1960), ez történt. Igen hatékony a fény átvitele a lámpából a lézeranyagba, ha ezek egy **ellipszoid tükör** (ellipszis alapú hasáb) egy-egy fókuszvonalán vannak. (Az ellipszoid tükör egyik fókuszpontjából induló fénysugarak mindegyike eljut a másik fókuszpontba.)

Gerjesztés fénnnyel/keresztirányban

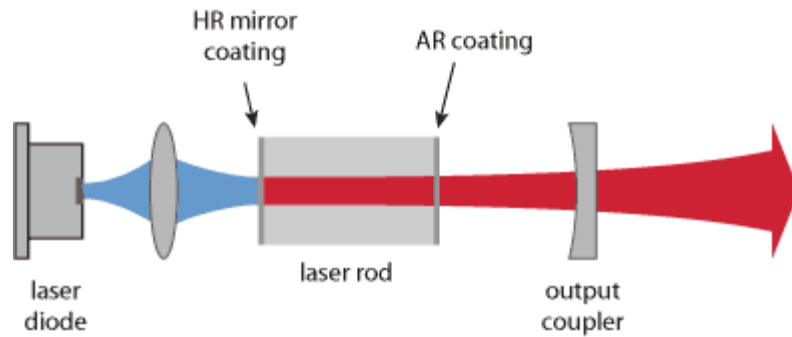


Rubinlézer gerjesztése
csavarvonal alakú
villanó lámpával

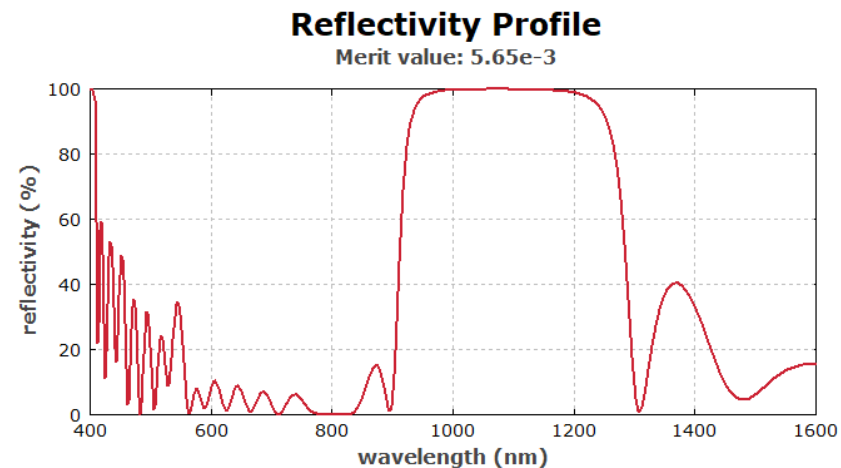
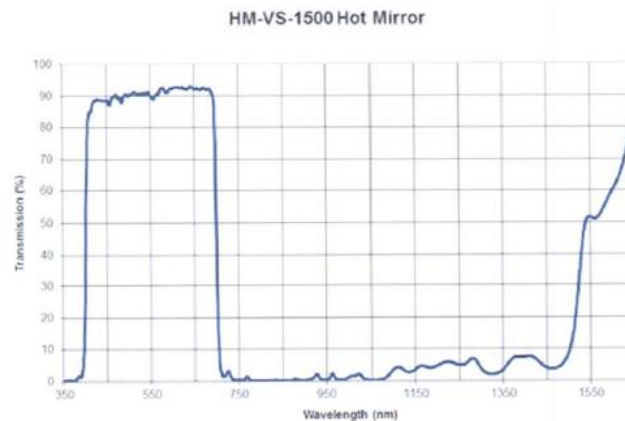


Nd:YAG lézer
gerjesztése ellipszoid
tükör geometriában

Gerjesztés fénnyel/hosszirányban



Ha keskeny frekvenciatartományú fénnyel (lézerrel) tápláljuk a lézert, akkor a longitudinális irányú táplálás a hatékonyabb. Ehhez speciális zárótükör kell, ami beengedi a gerjesztő fényt, de nem engedi ki a keletkező lézerfényt!

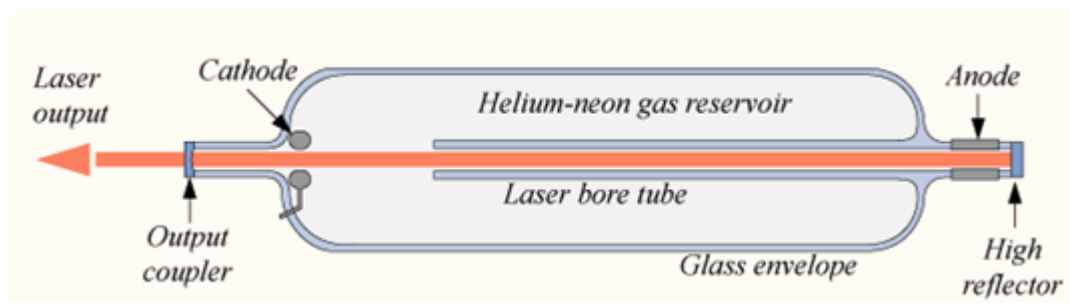


Gerjesztés elektromos kisüléssel (gázban)

Gőzfázisú lézertanyag esetén – és félvezető lézertanyag esetén is – a gerjesztési energiát **közvetlenül elektromos árammal** célszerű a lézertanyagba bevinni. Ezért a gázlézerek lényegében (a fénycsövekhez hasonló) **kisülési csövek**. A kisülés lehet **önfenntartó**, amikor a töltéshordozók (elektronok és ionok) maguk is a kisülési folyamatokban keletkeznek. De lehetnek **nem önfenntartók** is, ekkor a töltéshordozókat valamilyen más mechanizmussal kell a lézertanyagban létrehozni.

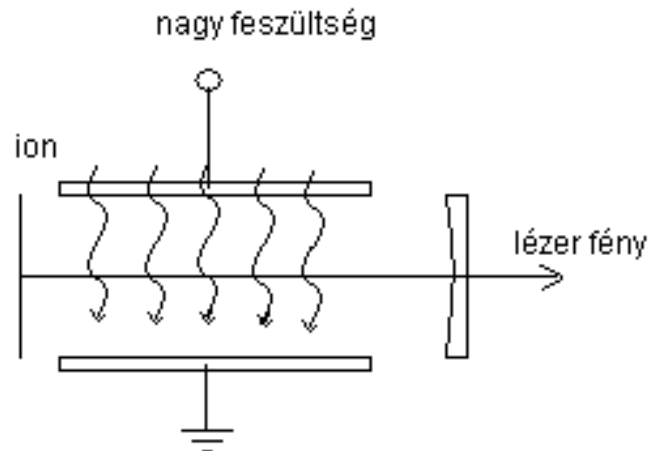
Önfenntartó kisülés csak kis nyomású gázokban lehetséges.

Ekkor a gáz annyira ritka, hogy **az elektronok két ütközés között az ionizációs energiának megfelelő mozgási energiára tudnak gyorsulni**. Az atommal ütköző elektron – a fotonnal ellentétben – nem veszik el az ütközés során, energiája egy részét megtartja. Az ionizációs energiát meghaladó energiájú elektronok – az energiájuktól függő mértékben ugyan, de képesek ionizációra is és/vagy gerjesztésre is. Az ionizáció során elektron keletkezik (ami a kisülés fenntartásához szükséges), a gerjesztés pedig a lézerműködés első lépése. Az önfenntartó kisülést általában a lézer tengelye irányába mutató elektromos térrel (**axiális felépítés**) valósítják meg.



Gerjesztés elektromos kisüléssel/2

Nagy nyomású gázban az elektronok szabad úthossza túl kicsi, ezért **önálló kisülés bennük nem lehetséges**. Ilyenkor a szabad töltéshordozókat más módszerrel (pl. ionizáció UV fénnel, elektronágyú, stb.) kell bevinnünk. Ezekben a lézerekben az elektromos mező iránya általában merőleges a lézer tengelyére (**transzverzális elrendezés**). A sűrűbb gázban a fotonok természetesen gyorsabban tudnak szaporodni (egységnyi hosszra vonatkoztatva), ezért ezek a lézerek általában nagyobb teljesítményűek. Ezeket a lézereket **TEA –lézereknek** (Transzverzális Elektromos tér Atmoszférikus nyomás) is nevezik.



Megjegyezzük, hogy a félvezető lézerekben is a lézertanyagon átfolyó áram által bevitt energia tartja fenn a lézerműködést. Itt azonban a felső lézernívóra nem ütközés révén jutnak fel az elektronok.

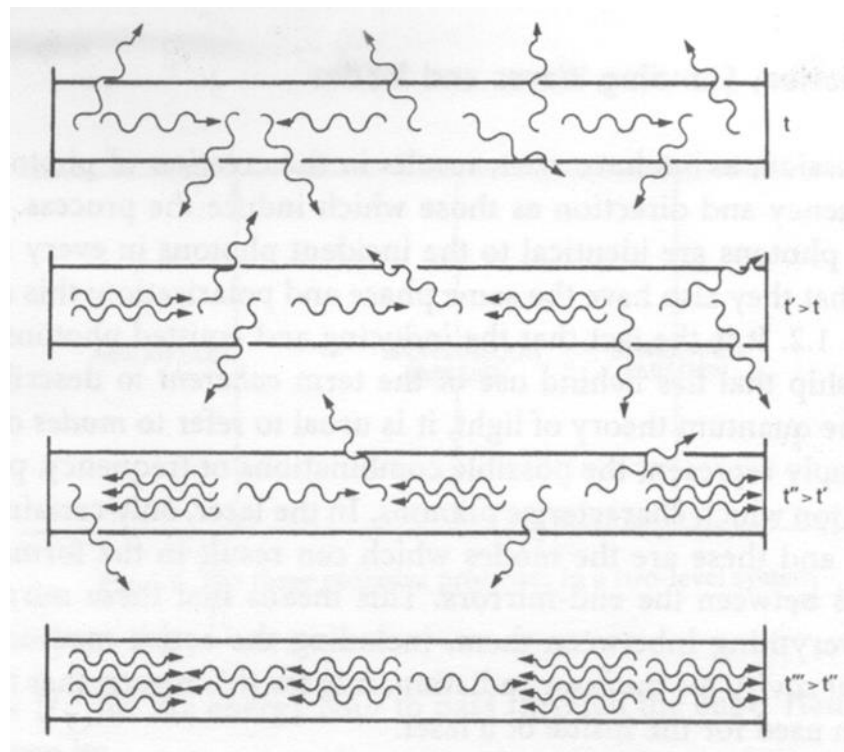
A tükörrezonátor

Ha a két meghatározott energiaszintre teljesül a populációinverzió feltétele, akkor a lézerműanyagban elindult megfelelő frekvenciájú sugárzás exponenciálisan erősödik.

Az első foton nyilvánvalóan csak spontán emisszióval keletkezhet, de a szaporodása indukált emisszióval történik. Mivel a lézerek tengelye mentén a sugárzás sokkal hosszabb utat tud a lézerműanyagban megtenni, mint más irányokban, ezért az ilyen irányú sugárzás erősödik fel a legjobban.

Ezt a hatást tovább fokozhatjuk, ha a tengelyre merőlegesen egy tükröt helyezünk el és a sugárzást a lézerműanyagba visszajuttatjuk. Ezáltal a sugárzás sokkal hosszabb úton fog erősödni, végleg elnyomva minden más irányú sugárzást.

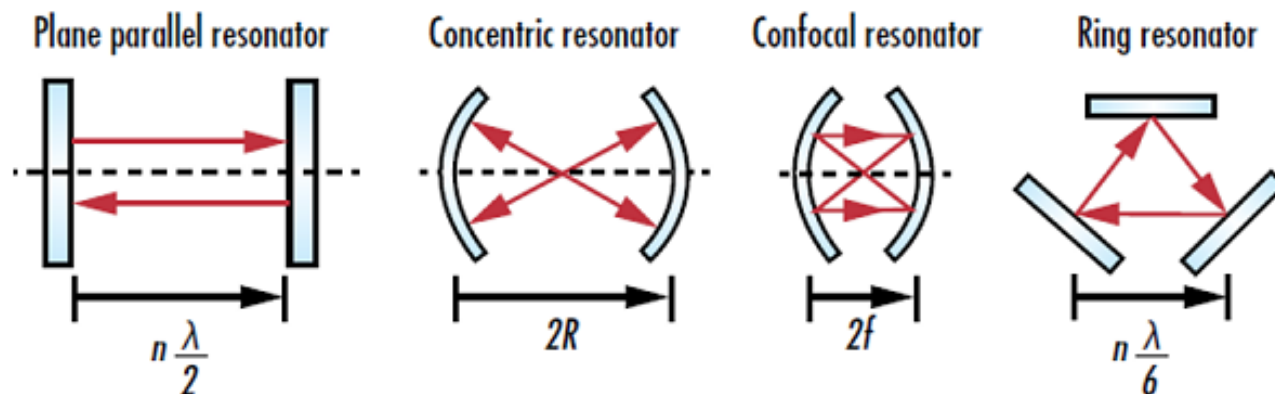
Ha a lézerműanyag másik oldalán is elhelyezünk egy tükröt – párhuzamosan az elsővel – akkor az oda-vissza verődések sorozatán keresztül a sugárzás a telítési szintig erősödhet.



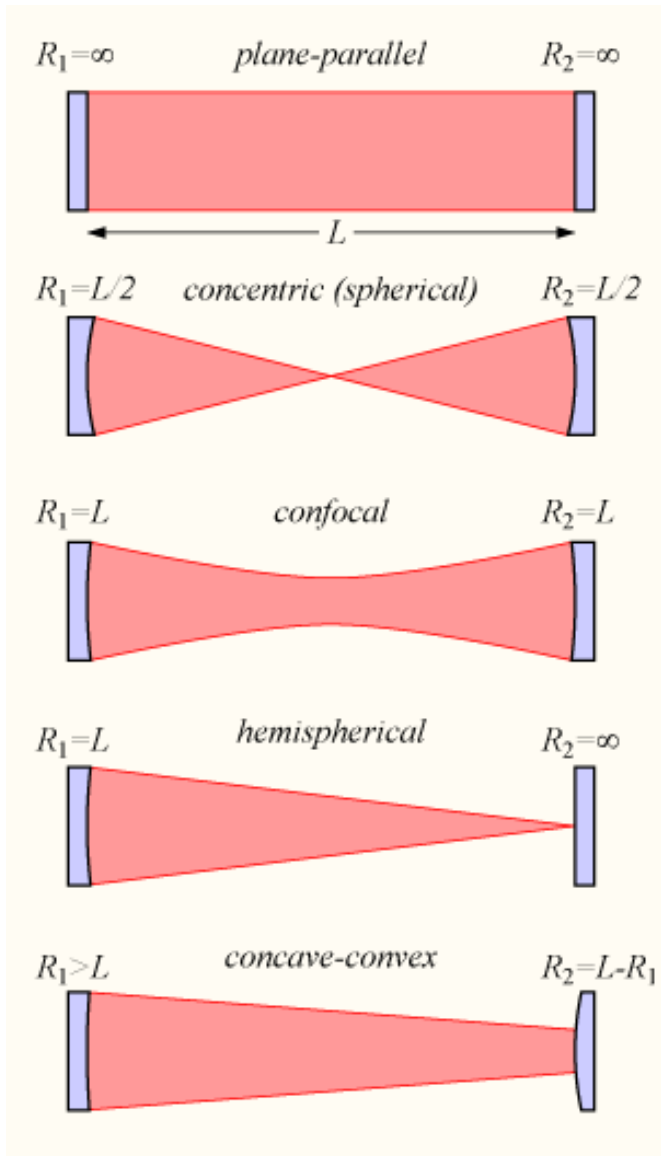
A tükörrezonátor/2

A két tükör egyikének természetesen félig áteresztőnek kell lennie, hogy a sugárzás egy részét kicsatolhassuk a lézerből, azaz lézersugarat nyerjünk. A másik tükörnek azonban lehetőleg 100 %-os reflexiójának kell lennie (zárótükör).

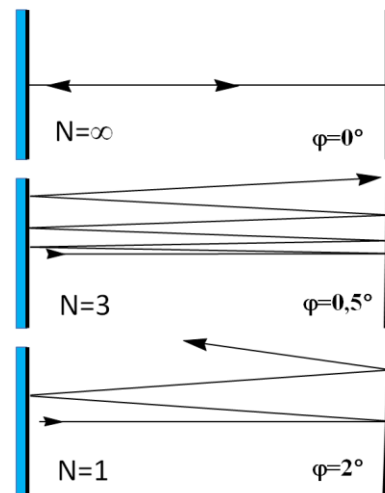
Fontos hangsúlyozni, hogy a lézertechnika tükrői általában nem közönségesek, hanem a vékony réteg interferencián alapuló tükrök. Ezek csak az erősíteni kívánt egyetlen frekvenciát (és szűk környezetét) verik vissza – de azt 100 %-osan – a többit átengedik. Ezáltal a gerjesztő fény a tükrön keresztül is becsatolható a lézeranyagba, a lézer működéséhez nem szükséges fotonok viszont ugyanitt erősödés nélkül elhagyják azt.



A tükörrezonátor/3



A síktükrű rezonátorok a legegyszerűbb rezonátorok, kihasználják a teljes lézer térfogatot, de igen kényesek a beállításra. A tükrök csekély elállítása esetén a sugár hamar kilép a rezonátorból. Csak nagy erősítésnél célszerű, amikor a sugár néhány visszaverődés után kilép a rezonátorból.



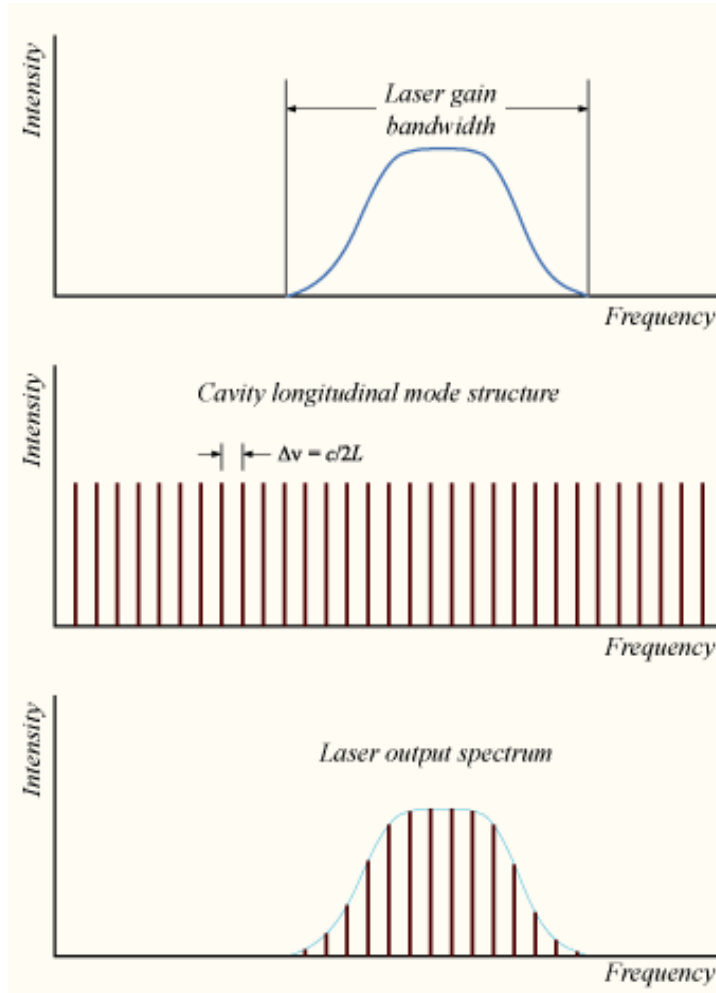
A gömbi tükröket tartalmazó rezonátorok nem annyira kényesek, de nem használják ki a teljes térfogatot.

A konfokális elég jó kompromisszum.

Megjegyzések

- A tükörrezonátort – az elektromérnöki személet szerint – felfoghatjuk úgy is, hogy ez szolgáltatja az erősítő visszacsatolását. Ez a visszacsatolás pozitív, ha a fotonfolyam a két tükrön történt visszaverődés után fázisban csatlakozik, tehát $2L=m\lambda$ (m egész szám) (De konfokálisban $4L=m\lambda$.)
- A fenti képletben a hullámhosszat frekvenciára is átírhatjuk ($f=c/\lambda$), ekkor $f=m\cdot c/(2L)$ Azaz a rezonátor által erősített frekvenciák közötti távolság $\Delta f=c/(2L)$. Más frekvenciákon a visszacsatolás negatív.
- A lézert általában pozitívan visszacsatolt rezgéskeltőként és nem külső, gyenge jelek erősítésére használjuk.
- A tükörrezonátor lehet nagyon rövid is (pl. koronglézer) és igen hosszú is (pl. szállézer vagy fiberlézer). Ez utóbbi lézerben a megfelelően adalékolt vékony üvegszál (vagy más anyag) a lézeranyag és egyben a tükörrezonátor is. A tükrök szerepét a szálvégek periodikus törésmutatójú tartománya játssza. Az üvegszálból a fény oldalt nem tud kilépni, a tükörrezonátor tehát föl is tekerceselhető, ami jelentősen csökkentheti a lézer helyigényét.
- A tükörrezonátor a lézerműködésnek nem elengedhetetlen feltétele. Vannak olyan lézerek, amelyek nem tartalmazzák (pl. röntgen-lézer).

A lézer longitudinális módusai

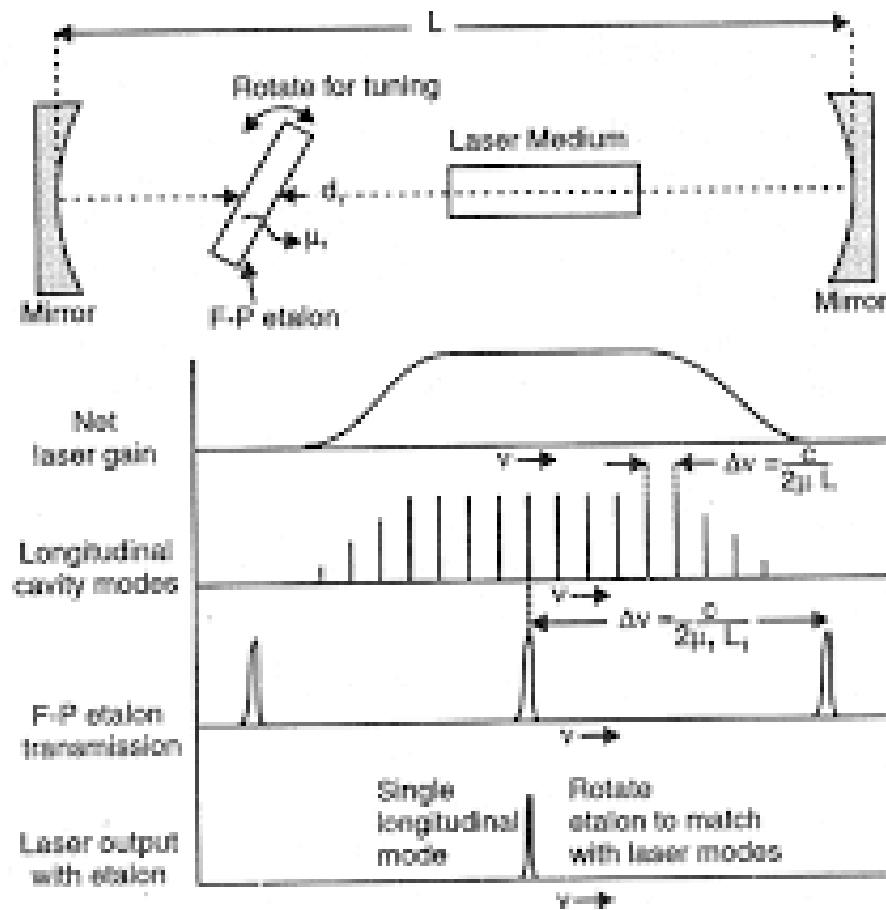


A lézeranyag erősítési görbéje. Ebben a frekvencia tartományban lehetséges az erősítés indukált emisszióval. Gázlézerekben ennek a szélességét főleg a Doppler-effektus határozza meg $\Delta f_{\text{Doppler}} \approx f_0(v/c) \approx 10^9 \text{ Hz}$

A tükörrezonátor ezeket a frekvenciákat képes erősíteni. A lézermódusok frekvencia távolsága $\Delta f_{\text{long}} \approx 10^8 \text{ Hz}$
egy módus kiszélesedése tipikusan $\Delta f_{\text{lézer}} \approx 10^6 \text{ Hz}$

A lézerfény frekvencia spektruma véges számú vonalat tartalmaz. Ezek a lézer longitudinális (hosszirányú módusai). Sok van belőle, ha széles az erősítési görbe vagy ha hosszú a rezonátor.

Módusszelekció Fabry-Perot etalonnal



Hosszú lézereknek sok longitudinális módusa van. Ezek közül kiválaszthatunk egyet a tükörrezonátorba helyezett Fabry-Perot etalonnal (ha mindenképpen egymódusú lézer kell).

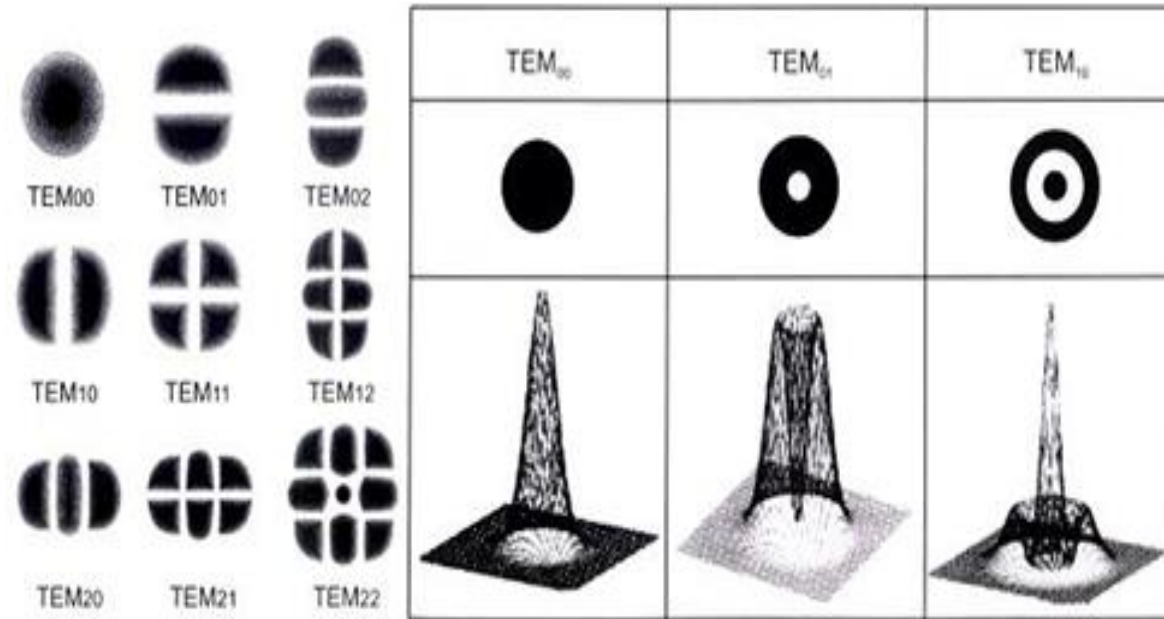
A lézer transzverzális módusai

- A tükörrezonátorban – függően a tükrök alakjától és méretétől - különféle állóhullám módusok alakulhatnak ki. Ezeket keresztirányú (transzverzális) módusoknak (TEM = Transversal Electromagnetic Mode) nevezzük. A transzverzális módusok leginkább a lézernyaláb keresztirányú intenzitás eloszlásában mutatkoznak meg. A legfontosabb módus az alaplómódus (TEM_{00}) amely egyetlen maximummal rendelkezik és eloszlása a Gauss-függvénnyel jellemezhető:

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma^2}}$$

- A transzverzális alaplómódust ezért Gauss-nyalábnak is nevezik. Ez a módus eredményezi a legkisebb átmérőjű (esetleg divergenciájú), legjobban fókuszálható nyalábot, sok alkalmazásban más módusa nem is lehet a lézernek.
- Vannak azonban más transzverzális módusok is, különösen vastag, nagy teljesítményű lézereknél. Ezeknek keresztirányban több maximumuk van, metszete foltokból, esetleg kör(ök)ből áll, ami mindenképpen nagyobb nyalábátmérőt, esetleg nagyobb nyalábdivergenciát is eredményezhet.

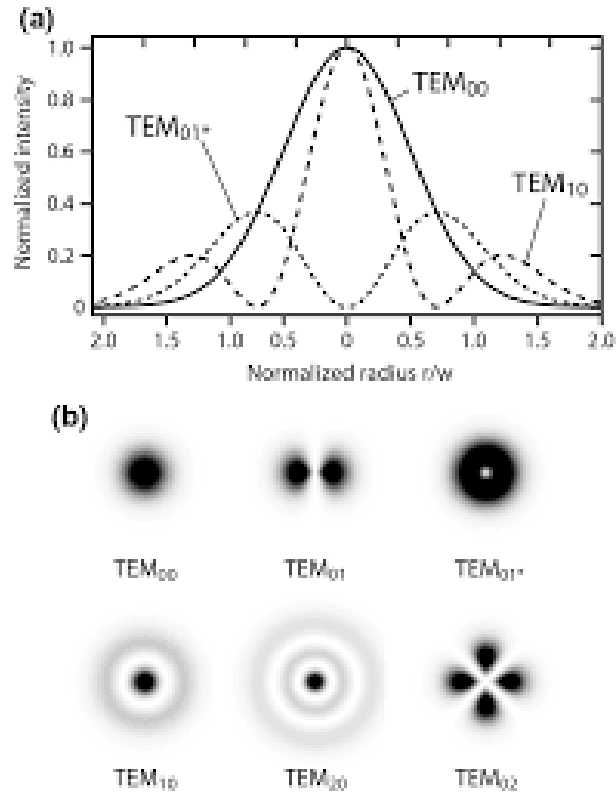
A lehetséges transzverzális módusok két különböző geometriában



Szögletes és **hengeres** geometria

Az indexben szereplő számok a tengelyek mentén a lokális intenzitás minimumok számát jelentik, a végtelenben lévő 0 értéket nem számítva.

Transzverzális módusszelekció



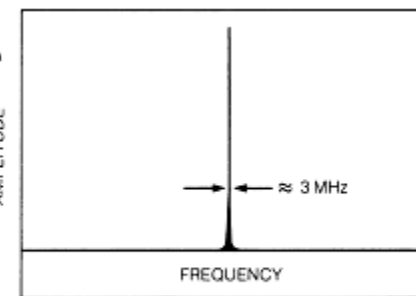
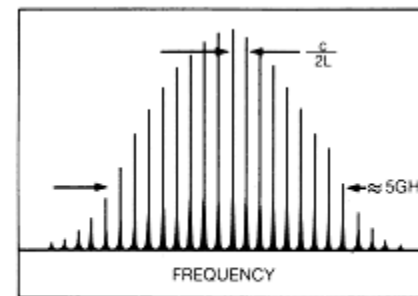
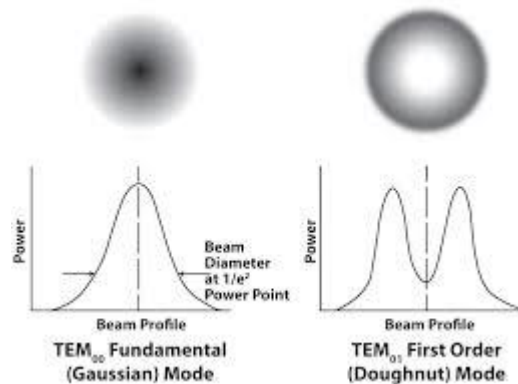
Az alaplóbus (TEM₀₀) jelenti a legvékonyabb nyalábot. A tükörrezonátorba helyezett megfelelő apertúrákkal – mivel azok a magasabb rendű módusokat jobban csökkentik – elérhető az alaplóbusú működés.

Nagy erősítésű lézerek esetén célravezetőbb lehet az instabil rezonátor, amelyből a magasabb rendű módusok hamarabb kiszóródnak.

Az alaplóbusú működés biztosítása mindenképpen nagy teljesítmény veszteséget jelent.

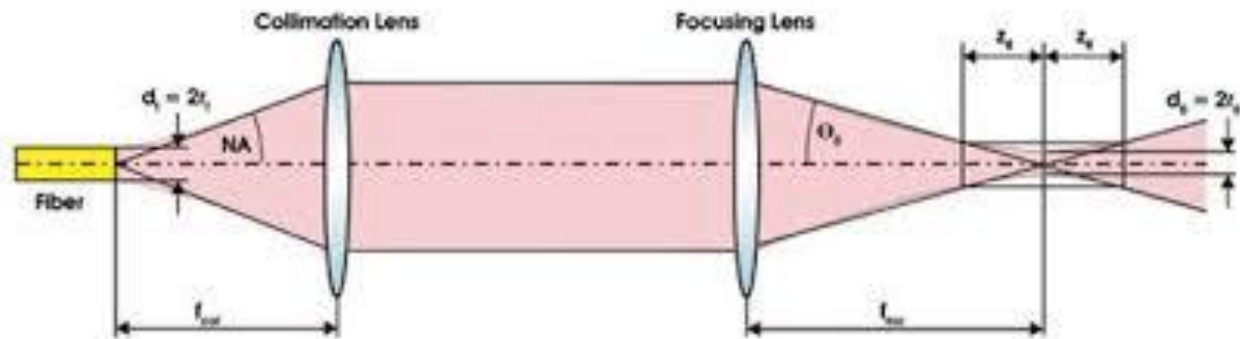
A lézerfény legfontosabb tulajdonságai

- Mint korábban is említettük, a lézerfény lehet **folytonos (CW)** és **impulzus üzemű** is. Ez utóbbi esetben a lézerimpulzus hosszát és ismétlődési frekvenciáját is ismernünk kell.
- A lézersugár – a lézer belső felépítésének megfelelően – lehet **polarizált (poláros)** és **polarizálatlan** is. Az alkalmazások jelentős része poláros lézernyalábot követel meg.
- A lézersugár további tulajdonságai – **irányítottság, monokromatikusság és teljesítmény** – tekintetében igen különleges, ami **más fényforrások által elérhetetlen**.
- Az irányítottság és monokromatikusság akkor a **legkedvezőbb**, ha a lézer longitudinális és transzverzális **alapmódu**sban működik. Ezt a nem kívánatos módusok elnyomásával tudjuk elérni, tehát a teljesítmény ilyenkor nem túl nagy.
- ***A nagy teljesítményű lézernyalábok általában sok longitudinális és transzverzális módust tartalmaznak.***



A lézerfény legfontosabb tulajdonságai/2

- Az irányítottságot a lézernyaláb divergenciájával jellemezzük. Ennek minimális mértéke elméletileg $\alpha \geq \lambda/(\pi \cdot d)$, amint azt egy korábbi fejezetben levezettük. Ezt az elvi határt csak a transzverzális alaplómódusú (TEM_{00}) lézerek tudják megközelíteni. **A divergencia** függvénye a lézernyaláb átmérőjének, **nyalábtágítással** tehát **csökkenthető**.
- Kis divergenciájú nyalábok kisebb folttra fókuszálhatók. Első közelítésben a folt átmérője (D) a lencse fókusztávolságának (f) és a nyalábdivergenciának a szorzata: $D \approx f \cdot \alpha \geq f \cdot \lambda/(\pi \cdot d)$, ennek legkisebb értéke (ha $f \sim \pi d$) **a hullámhossz körüli érték**.
- A monokromatikusságot a lézerfény frekvencia kiszélesedésével jellemezhetjük, ez – egyetlen longitudinális módus esetén – sokkal kisebb lehet a természetes vonalszélességnél is. A keskeny spektrumvonalhoz nagy koherenciahossz tartozik (interferenciás mérések).



A lézerfény legfontosabb tulajdonságai/3

- Élesen meg kell különböztetnünk a CW lézerek teljesítményét és az impulzusüzemű lézerek csúcsteljesítményét. A **folytonos üzemű lézerek** közül a kisnyomású gázlézerek (pl. He-Ne) teljesítménye gyakran a mW-ot sem éri el, a nagynyomású CO₂ lézerek és a Nd: YAG lézerek folytonos teljesítménye 10 kW is lehet.
- Az **impulzusüzemű lézerek** csúcsteljesítménye erősen függ az impulzusidők hosszától. Nyilvánvaló, hogy adott átlagteljesítmény mellett a csúcsteljesítmény akkor nagyobb, ha az impulzusidő rövidebb. Egy ps ($= 10^{-12}$ s) impulzusidő esetén a csúcsteljesítmény akár a **10¹⁴ W-ot is elérheti** (vö. a világ elektromos energia termelése 10¹² W nagyságrendű).
- A jól fókuszált lézernyalábban különösen nagy teljesítménysűrűség lehet. Egy 1 kW-os lézernyalábot egy 10 μm²-es foltra fókuszálunk, akkor az 10¹⁴ W/m² teljesítménysűrűséget jelent, amely a Nap felszínén mérhető értéket hat nagyságrenddel meghaladja.
- Mivel ezt a teljesítményt a lézer egy keskeny frekvenciatartományban sugározza ki (pl. $\Delta f_{\text{lézer}} \approx 10^8$ Hz) a spektrális teljesítménysűrűség óriási lesz, a lézer a Napot egybilliószorosan (10¹²) is felülmúlhatja (a Nap sugárzásának 10¹⁴ Hz széles a spektruma).

Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a kakukktojást!

- A) transzverzális alapmódus
- B) Gauss-nyaláb
- C) minimális keresztmetszetű lézernyaláb
- ☒ D) minimális frekvencia szélességű lézernyaláb

Hosszabb tükörrezonátor esetén nagyobb a lézermódusok frekvencia távolsága.

- A) Az állítás igaz
- ☒ B) Az állítás nem igaz, mert hosszabb tükörrezonátor esetén kisebb a lézermódusok frekvencia távolsága
- C) Az állítás nem igaz, mert a lézermódusok frekvencia távolsága nem függ a tükörrezonátor hosszától
- D) Az állítás nem igaz, mert minden lézer csak egyetlen frekvencián sugároz

Ismétlő kérdés

Tételezzük fel, hogy egy lézer keresztirányú alaplómódusban 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 csavarvonalszerűen körbevette a lézeranyagot
- d) A lézer longitudinális irányú fénnel 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!!!

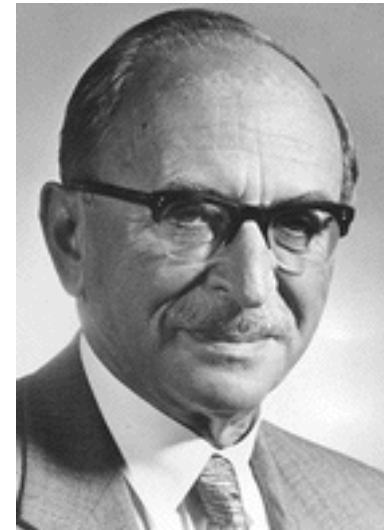
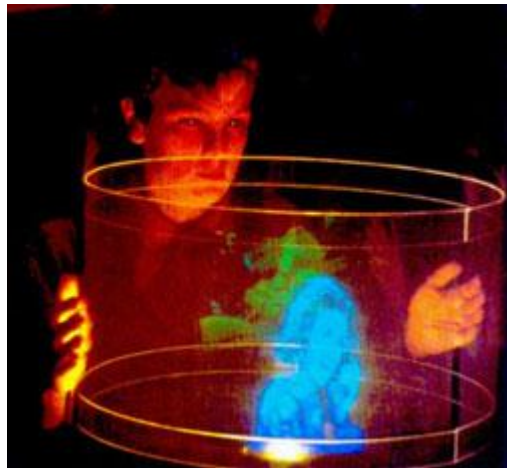
1928 Rudolph W. Landenburg: Stimulált emisszió („negatív abszorpció”) kísérleti biz.

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**

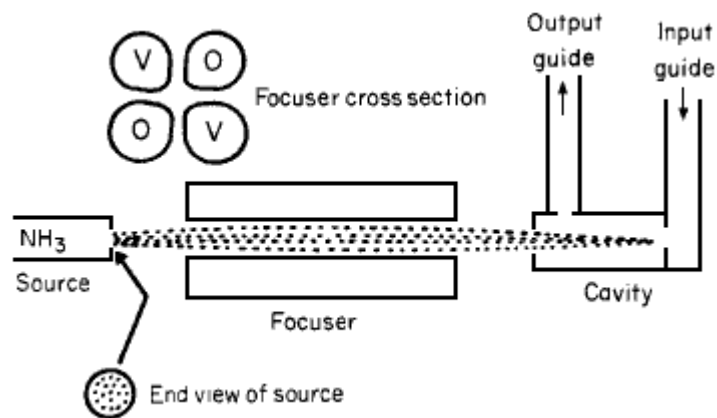
1947 Gábor Dénes:
holográfia alapelve
kivitelezés lézerekkel
Nobel-díj: **1971**



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

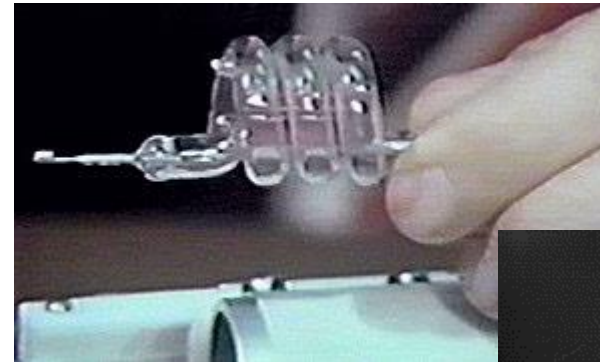
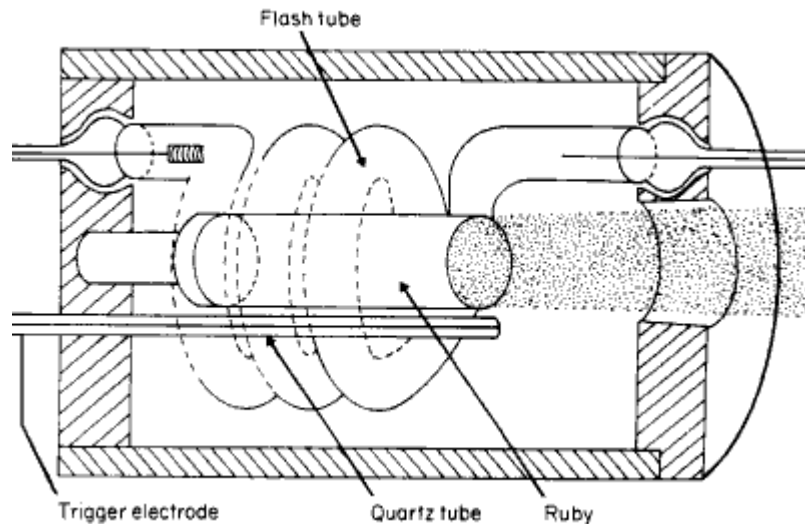
Nobel-díj (1964): Townes, Basov and Prokhorov

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 Electric): 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 hétköznapiakba, 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)

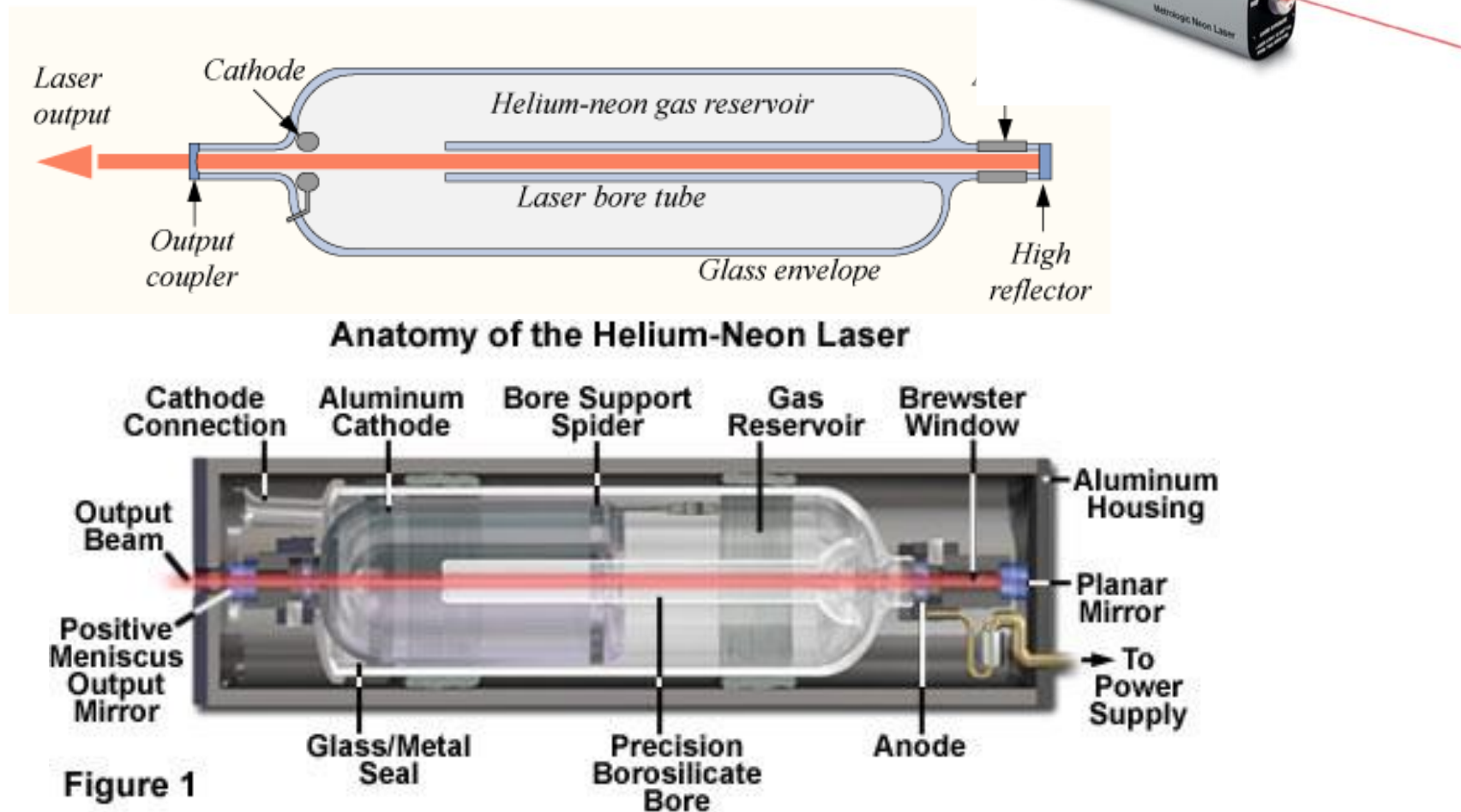
Pumpálás: elektromos energiával, gázkisülést létrehozva
(optikai pumpálásnak nincs értelme, mert a gázok abszorpciós vonalai
keskenyek)

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

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

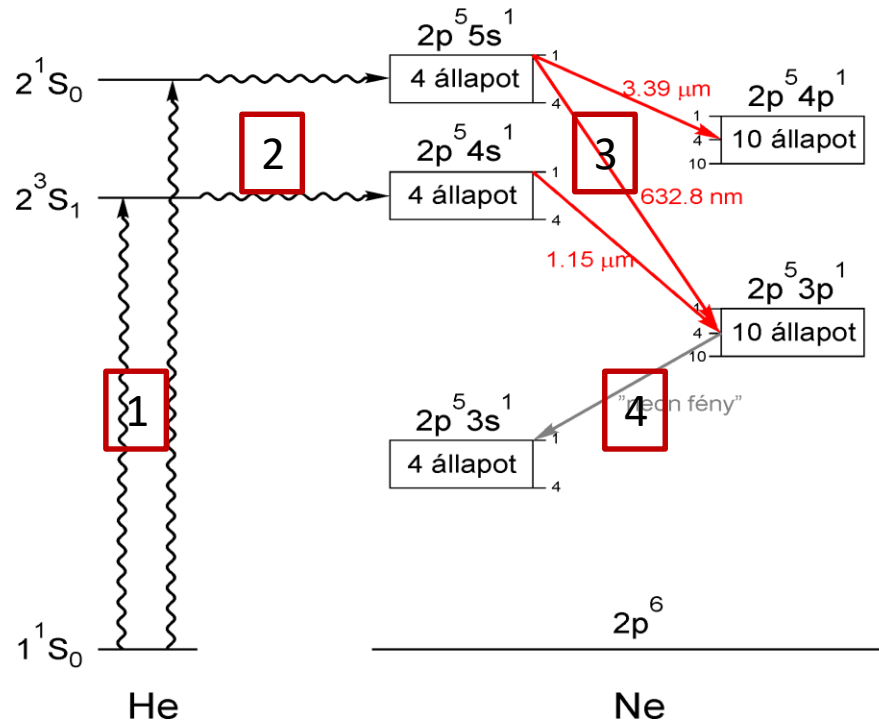
Nd-YAG lézer $\sim 10^{25} - 10^{26}$ Nd-ion/m³

Hélium-neon lézer



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)

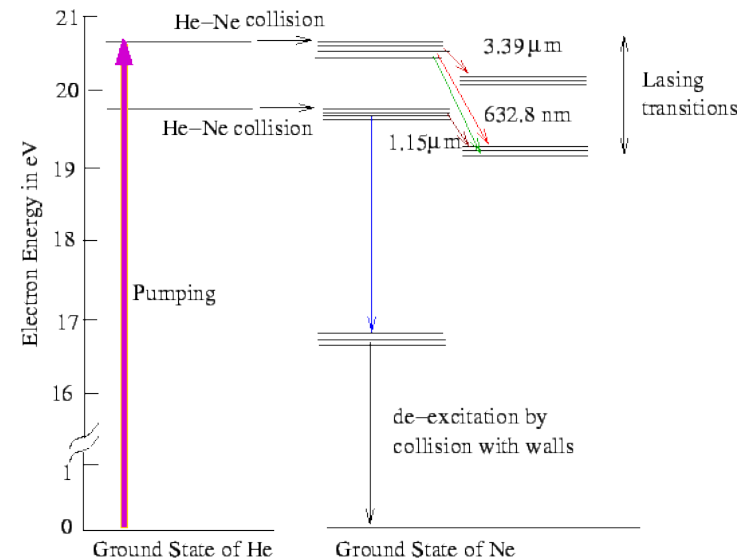
2. lépés: a gerjesztési energia átadása a Ne atomnak
 $He^* + Ne \rightarrow He + Ne^*$
Feltétel: a He^* és Ne^* energiái egyezzenek

3. lépés: lézerátmenet
Populáció inverzió a két szint között $\lambda=633nm$

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 gázcsere.
- 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)

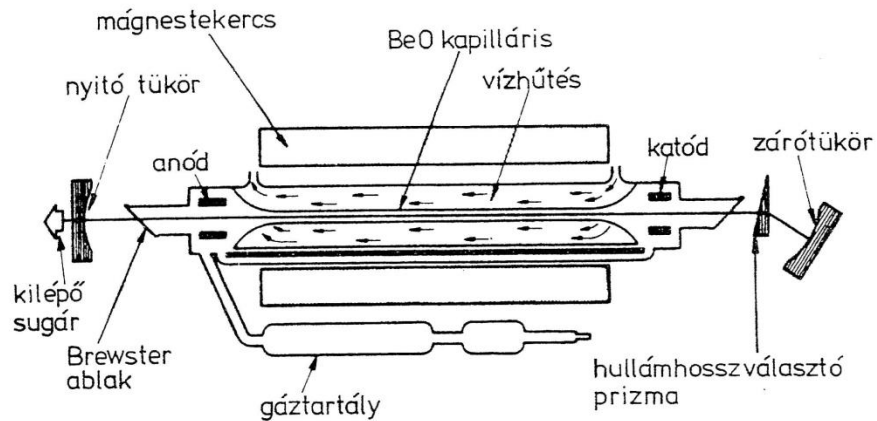
Lézer közeg: $\sim 0,5$ torr nyomású Ar-gáz, kisülési csőbe töltve

Kisülésben	- gerjesztett molekulák - alapállapotú ionok - különböző gerj. áll. ionok	} jönnek létre (plazma)
------------	---	-------------------------

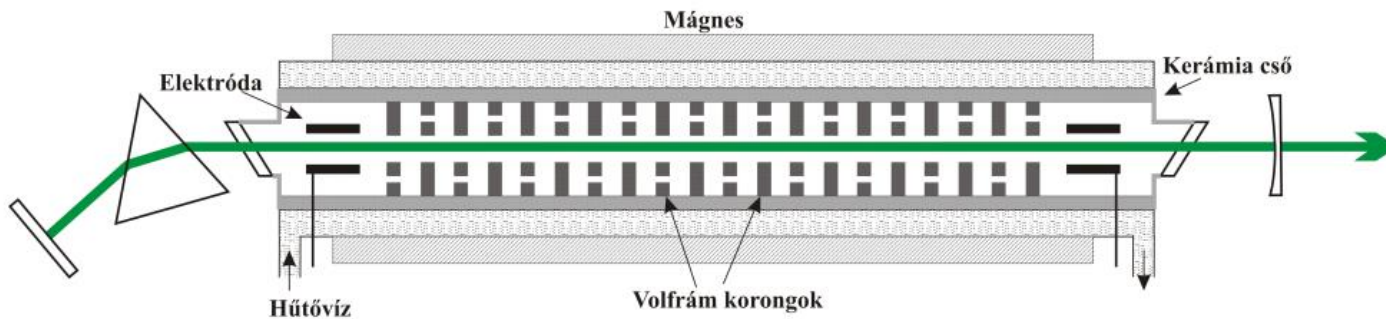
A kisülési cső működési jellemzői: áramerősség, feszültség, nyomás, hőmérséklet - ezektől függ az Ar^+ ionok populációja különböző energiaszinteken.

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

Az argon(ion)lézer felépítése

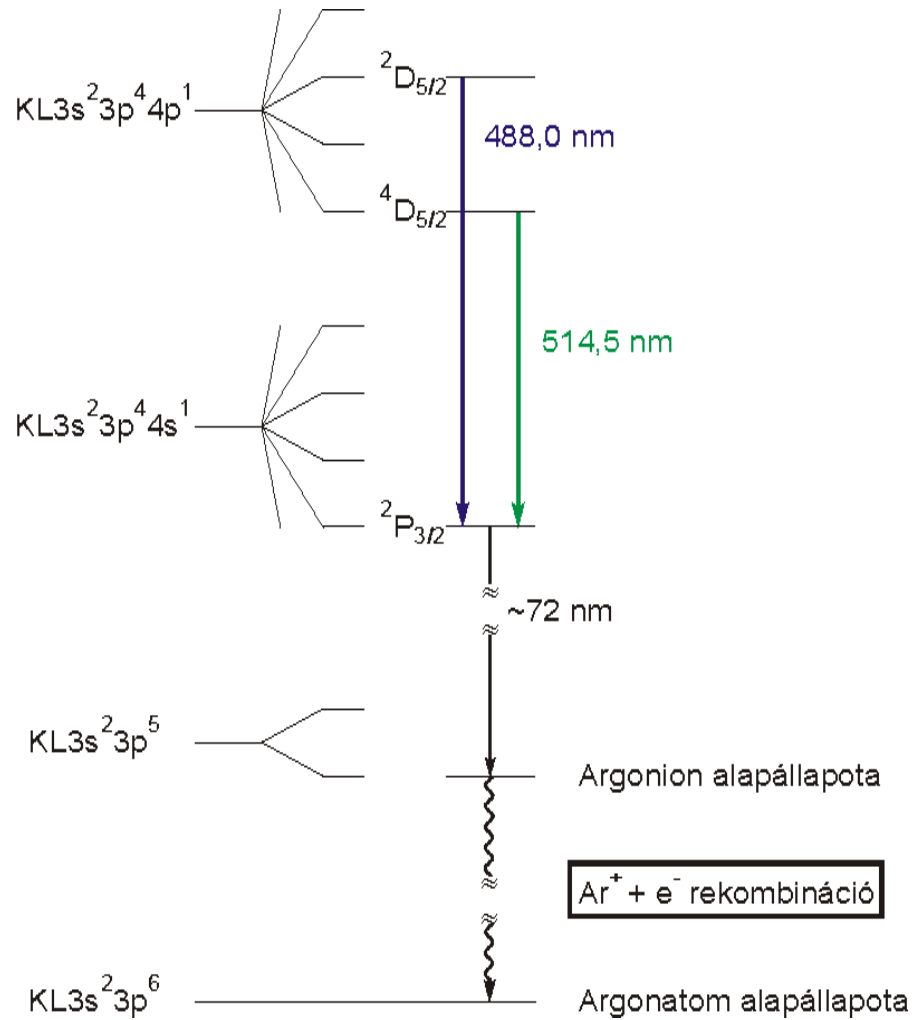


- Nagy áramerősség és hőmérséklet kell ahhoz, hogy a gerjesztett ionállapotok jelentős populációt tartsanak
- Általában sok lézerátmenet kialakul. Közülük, ha szükséges, egy diszperziós elemmel válogathatunk.



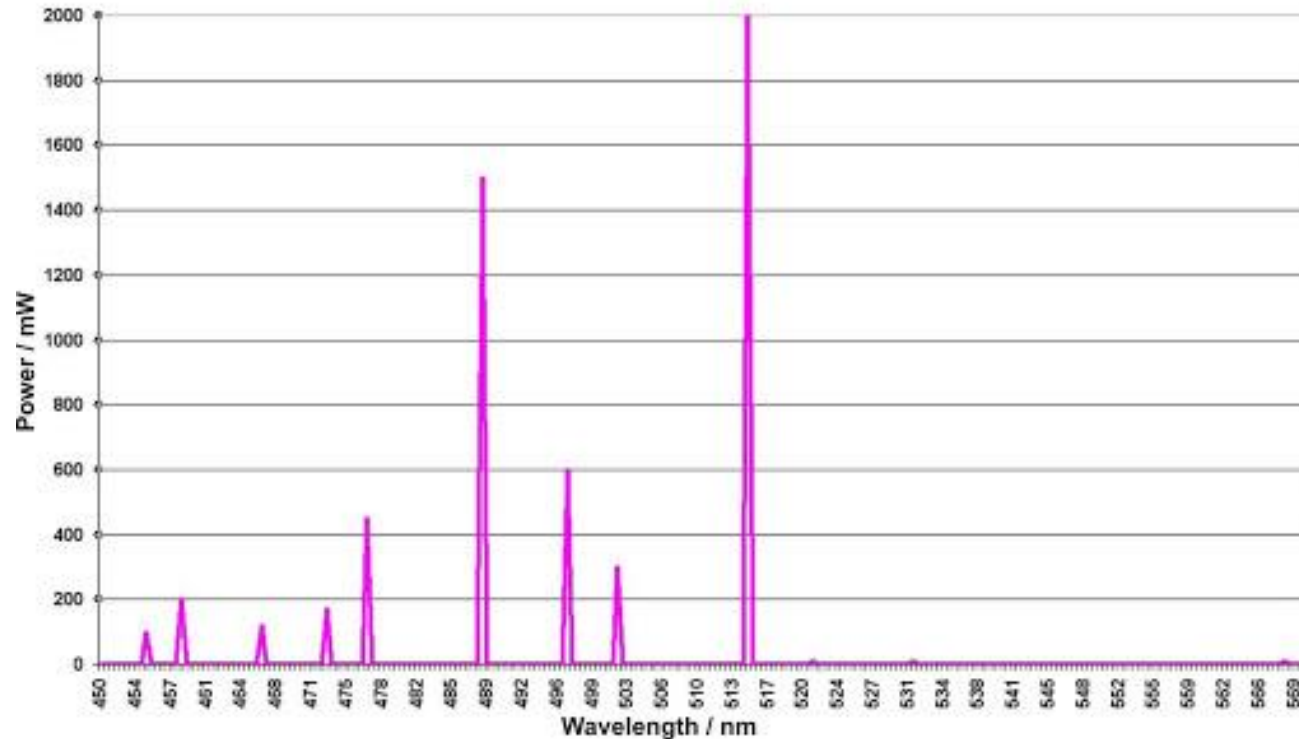
A magas hőmérséklettől a lézercső falát a plazma mágneses térrel történő koncentrációjával lehet valamelyest védeni. A fal ennek ellenére is nagyon felmelegszik, ezért különleges anyagból kell készíteni és erősen kell hűteni.

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

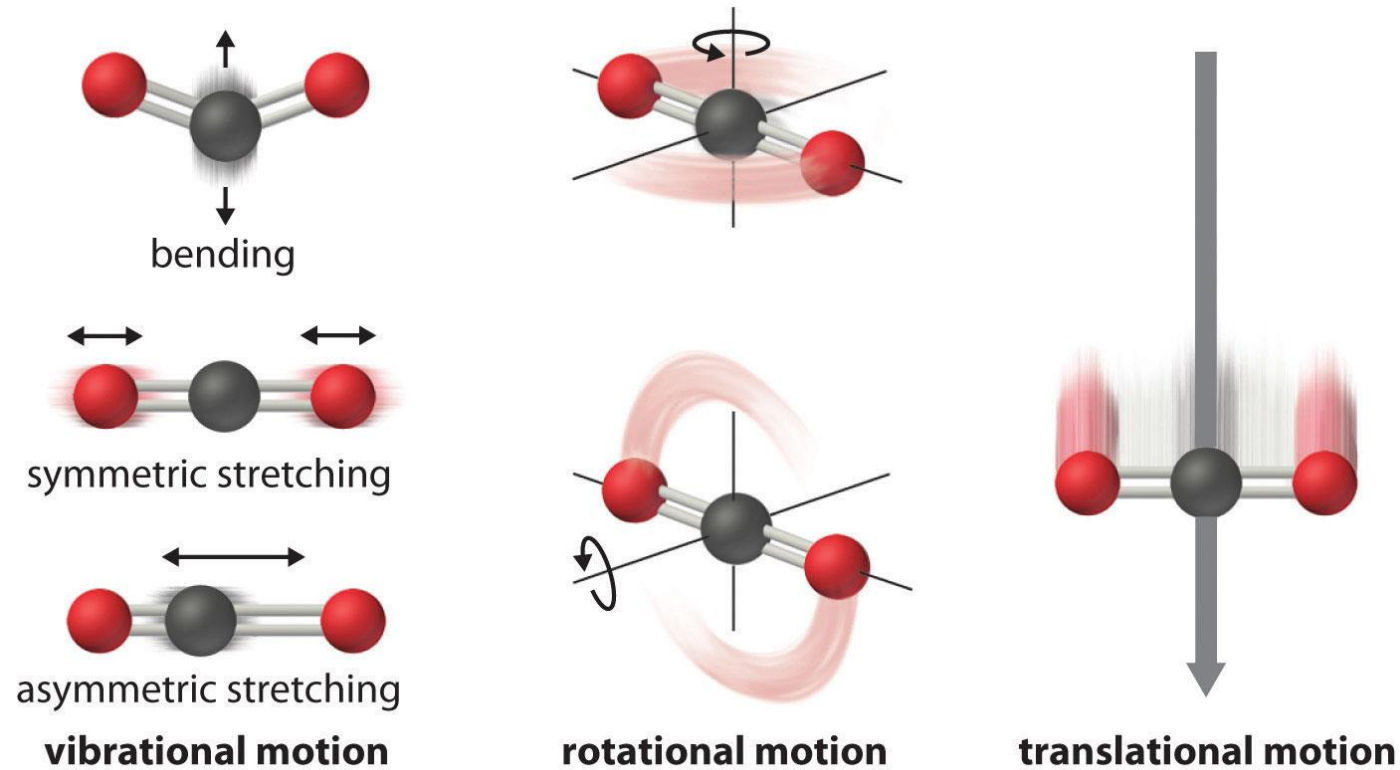


Az argon-ion lézer nagyobb teljesítménnyel a **488 nm-es (kék)** és az **514,5 nm-es (zöld)** hullámhosszakon tud működni. Vannak más, kisebb teljesítményű hullámhosszai is (pl. 457,9 nm (ibolya)). Ezek külön-külön és együttesen is működhetnek, ez utóbbi esetben **az argon-ion lézer fénye kékesfehér**.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

A molekuláris lézerek

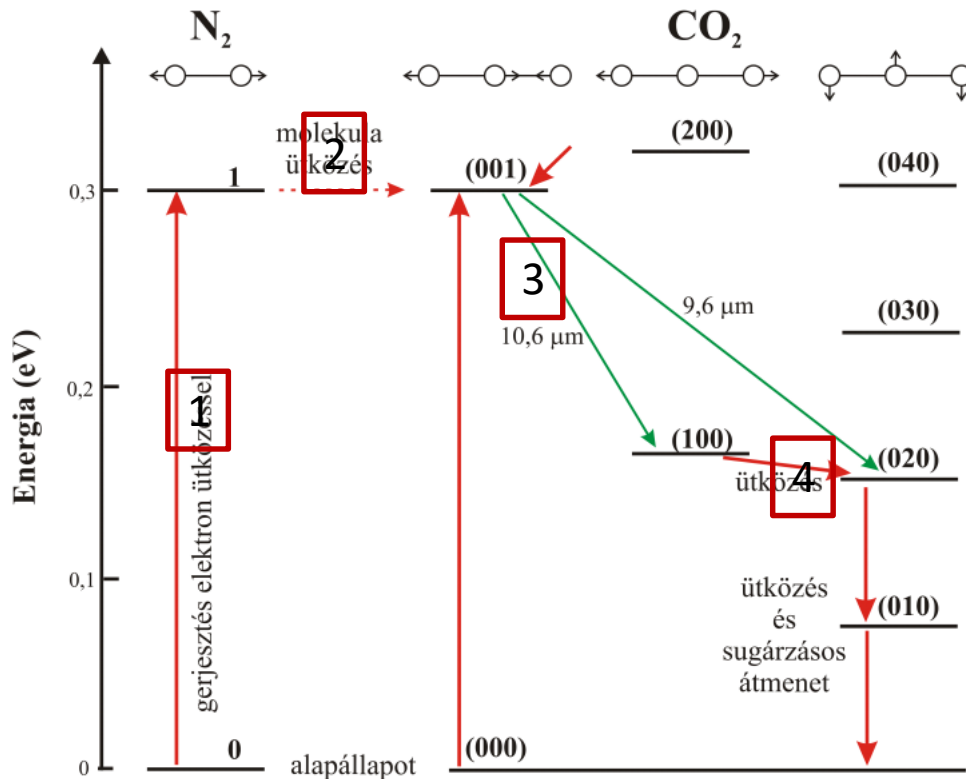
- A molekuláris lézerekben a gerjesztés nem az atomi héjakon, hanem az ennél sokkal kisebb molekuláris energiaszinteken történik.
- Ezek az energiaszintek a molekulák forgásából (rotációs energiaszintek) és rezgéséből (vibrációs energiaszintek) származnak.
- A vibrációs szintek tipikusan néhány tized 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!

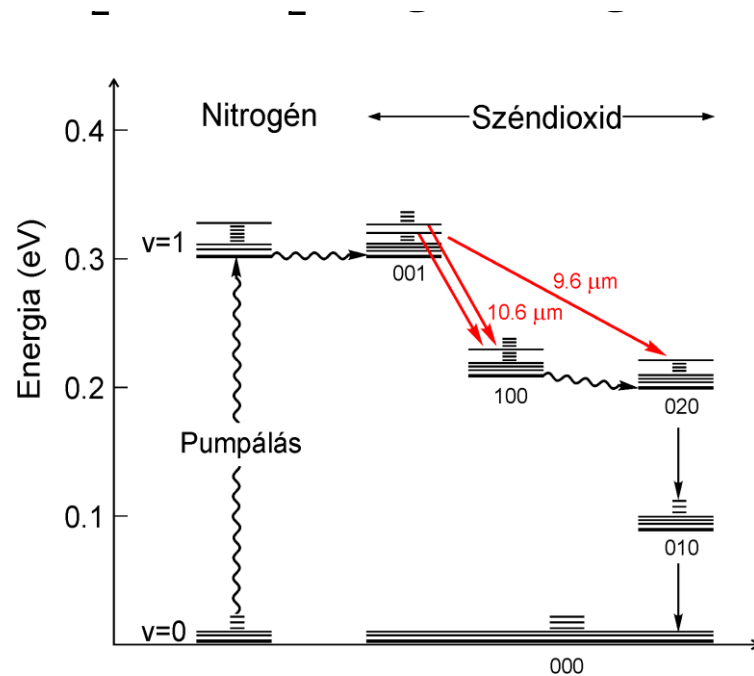
1. lépés: a N₂ molekula gerjesztése elektron ütközéssel. A N₂* fotonos bomlása valószínűtlen

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: lézerátmenet
 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.

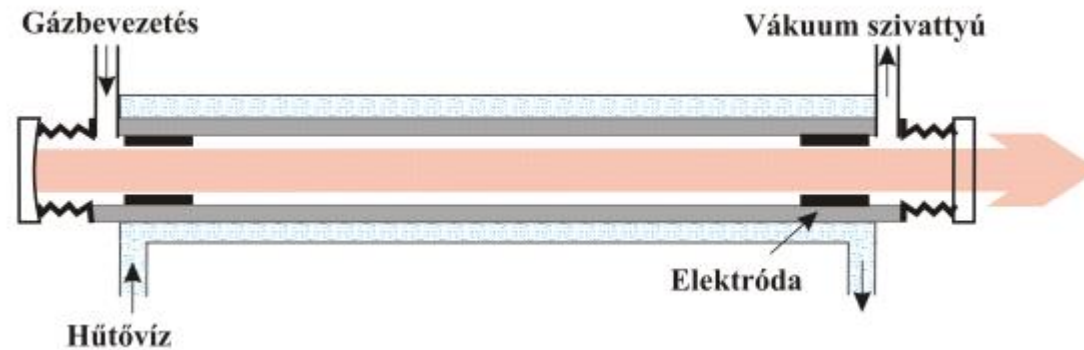
A CO₂ lézer felépítése

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.

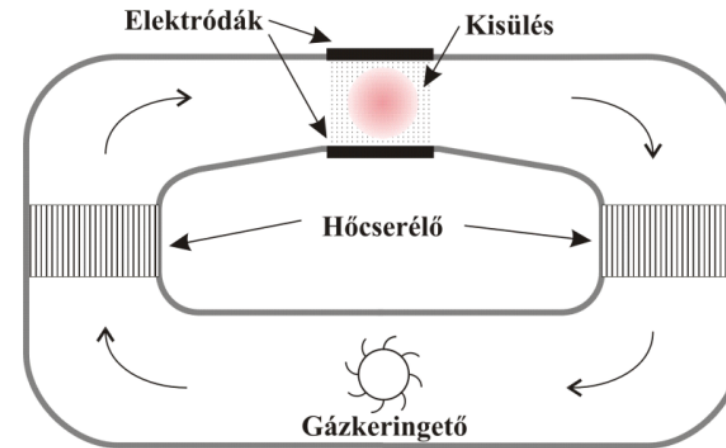


Longitudinális áramoltatású és gerjesztésű CO₂ lézer felépítése.

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 tette nagyobb gáznyomás (100 mbar) és nagyobb pumpáló áramerősség alkalmazását és többször **10 kW-os** teljesítményű lézerek megépítését.



A transzverzális gerjesztésű, atmoszférához 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