

# Műszaki lézerfizika

4. előadás: A lézerek általános felépítése

# Ismétlő tesztkérdések

Teljesen párhuzamos (divergencia mentes) lézernyalábot nem lehet csinálni, mert az energia bizonytalanságának és az idő bizonytalanságának a szorzata nem lehet tetszőlegesen nagy.

- a) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat
- b) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes
- c) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- d) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van

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

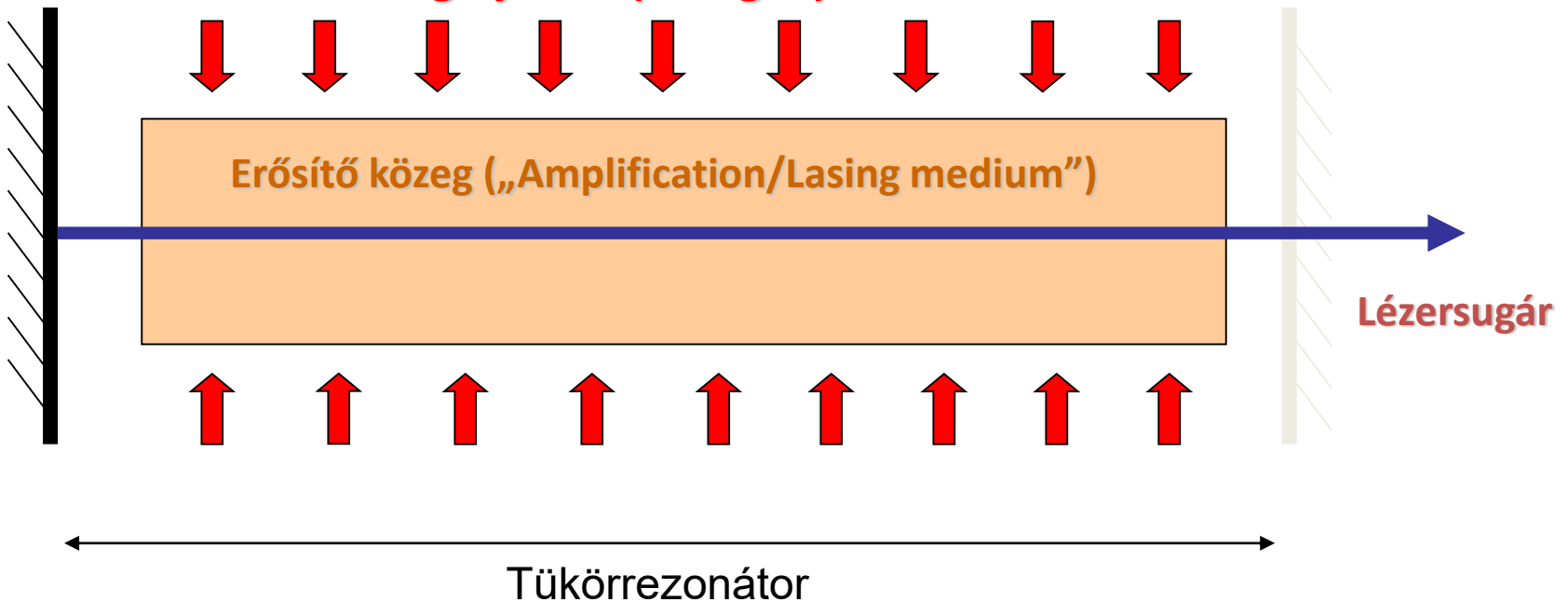
Light  
Amplification by  
Stimulated  
Emission of  
Radiation

**fényerősítés** a sugárzás  
**indukált** (stimulált)  
**emissziója** által

Tükör  
(100% visszaverés)

**Külső gerjesztő (energia-) forrás**

Részben átteresztő tükör  
(~99% visszaverés)



# 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  $\Delta t$  időtartamra vagy az ez alatt a fény által megtett  $\Delta x$  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:

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

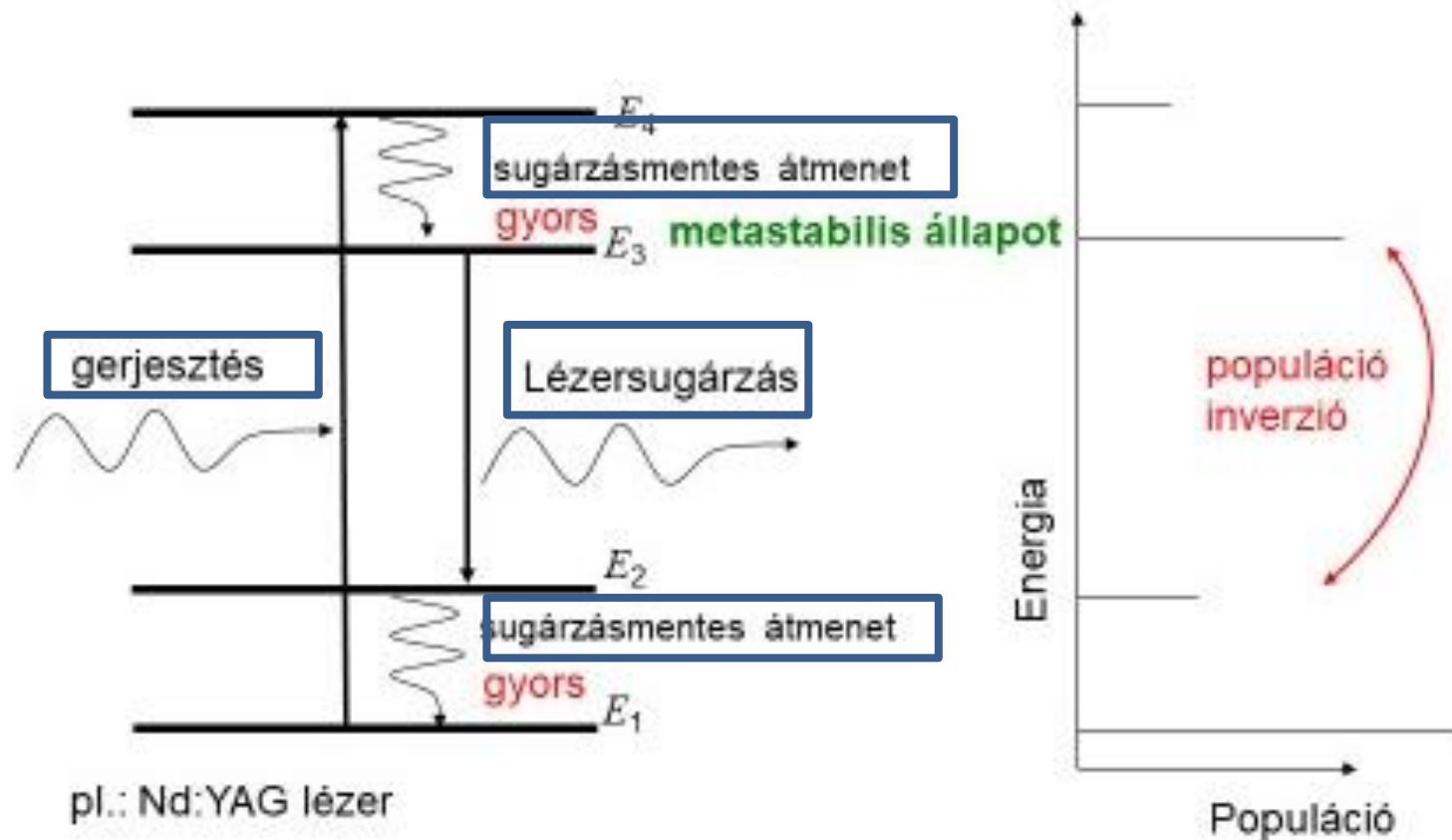
A differenciálegyenlet megoldása exponenciális függvény lesz, tehát a lézer anyagában megtett útja függvényében a sugárzás exponenciálisan erősödik:

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

(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

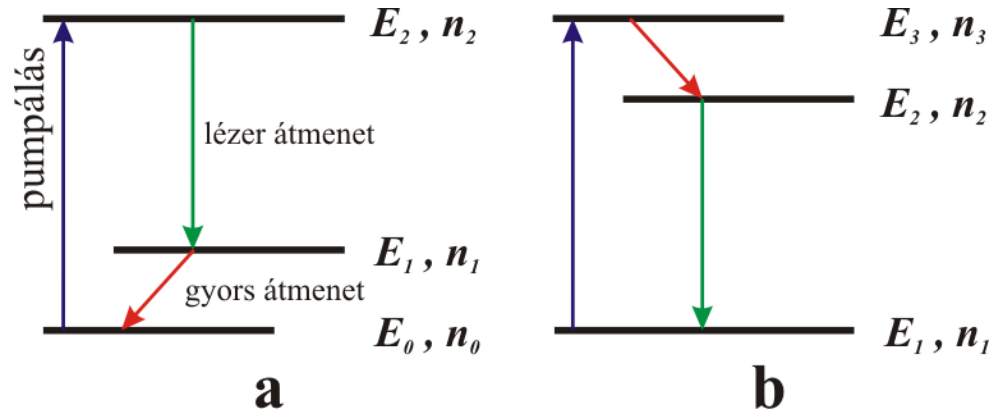


Lézerműködés négy lépésben:

- 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!

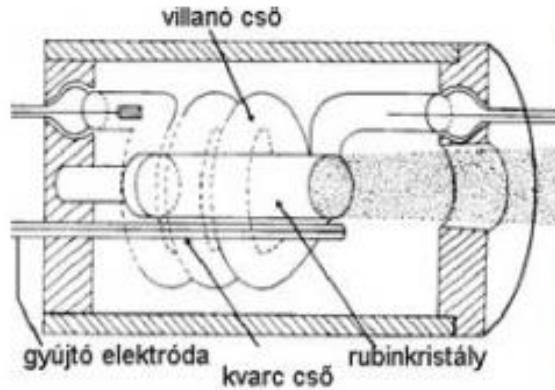
# A gerjesztés módjai: 1, gerjesztés fénnnyel

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 nívónak nagyon szélesnek kell lennie. Ha a felső nívó keskeny, akkor viszont közel monokromatikus fényt kell gerjesztéshez használni.

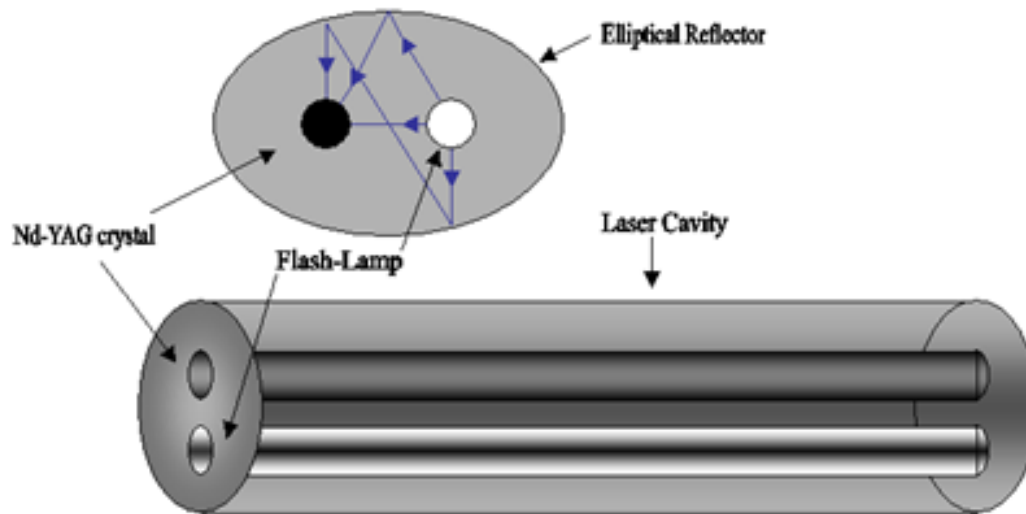
Az első lézerekben a populáció inverziót még nem tudták folyamatosan fenntartani, a fényt **villanólámpa** (xenonlámpa) szolgáltatatta. Folyamatos működésű (CW = continuous wave) lézereket természetesen **folytonos fénnnyel** kell táplálni. Ez ma leginkább LED-del vagy egy másik lézerrel (félvezető lézerrel)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



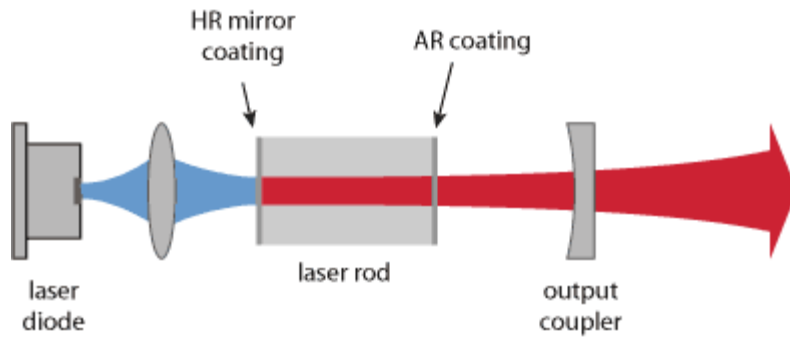
Rubinlézer gerjesztése csavarvonal alakú villanó lámpával



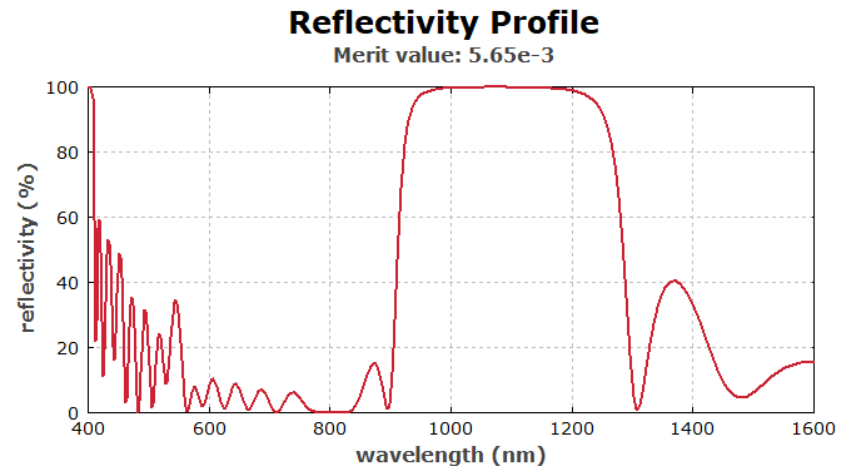
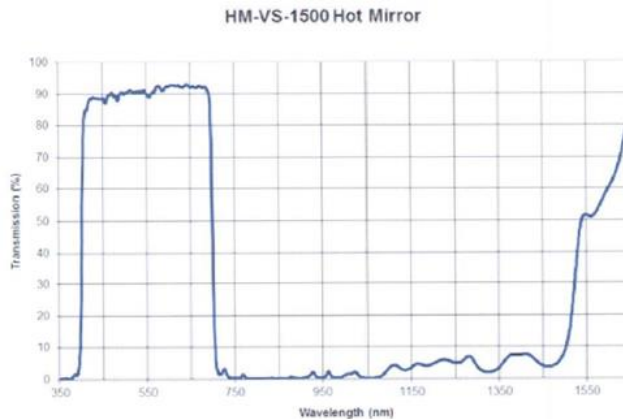
Nd:YAG lézer gerjesztése ellipszoid tükör geometriában



# Gerjesztés fényel/hosszirányban



Ha keskeny frekvenciatartományú fényel (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!

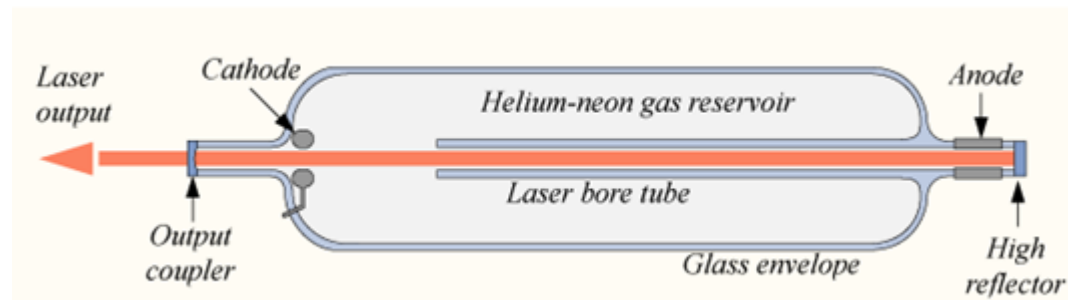


# Gerjesztés elektromos kisüléssel (gázban)

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) **kisülésű 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.

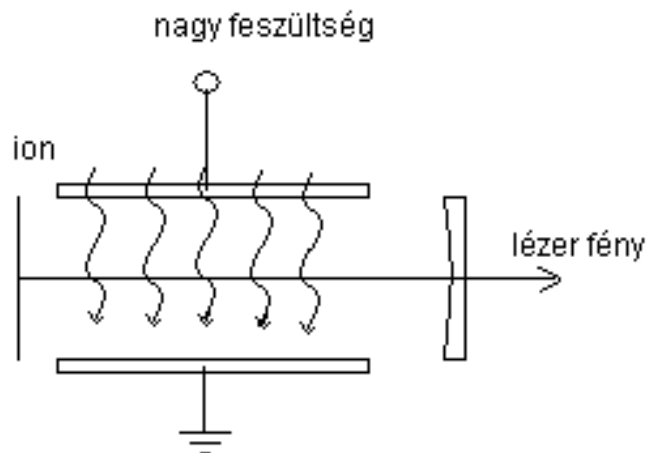
**Önfenntartó kisülés csak kis nyomású gázokban lehetséges.**

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 lézeranyagon átfolyó áram által bevitt energia tartja fenn a lézerműködést. Itt azonban a felső lézernívóra nem ütközés révén jutnak fel az elektronok.

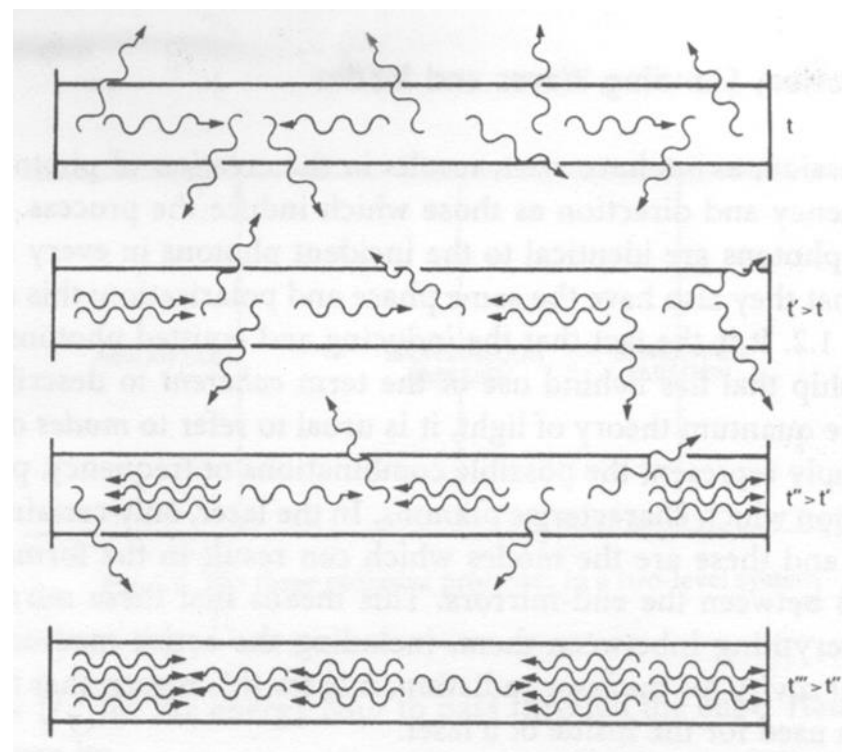
# A tükörrezonátor

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.

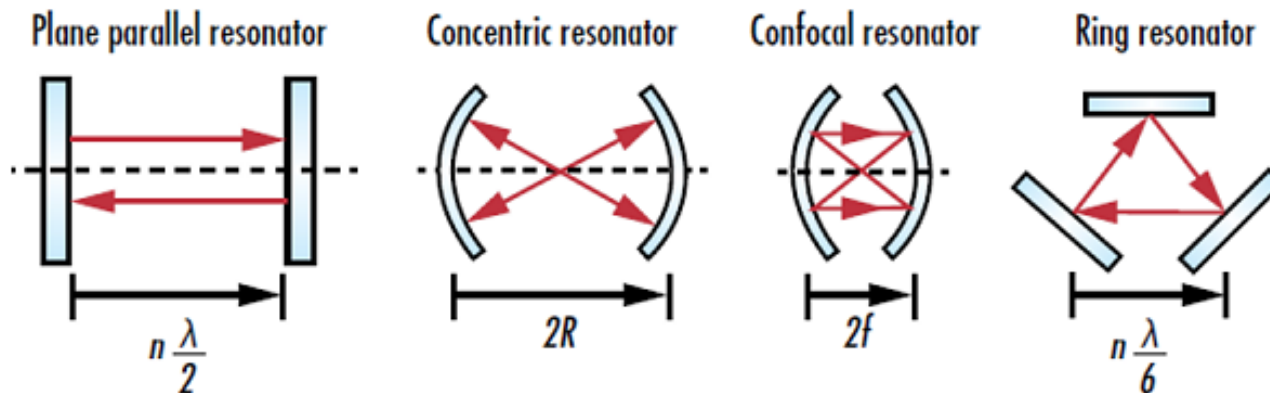
Ha a lézerműanyag másik oldalán is elhelyezünk egy tükröt – párhuzamosan az elsővel – akkor az oda-vissza verődések sorozatán keresztül a sugárzás a telítési szintig erősödhet.



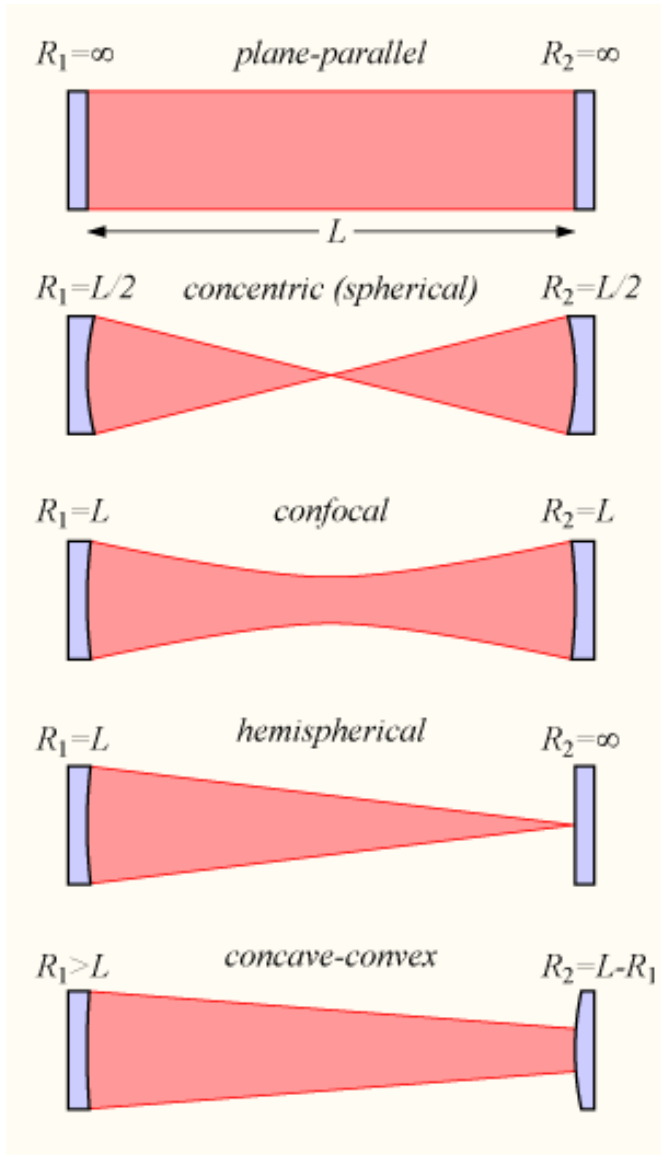
# A tükörrezonátor/2

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).

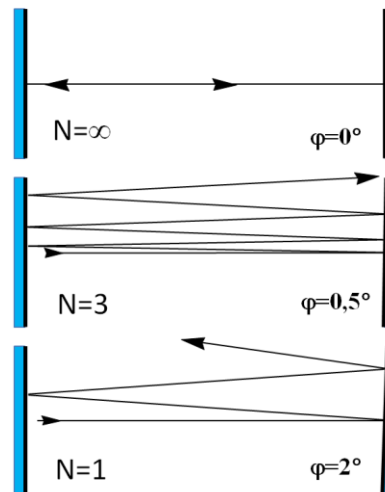
Fontos hangsúlyozni, hogy a lézertechnika tükrői általában nem közönségesek, hanem a vékony réteg interferencián alapuló tükrök. Ezek csak az erősíteni kívánt egyetlen frekvenciát (és szűk környezetét) verik vissza – de azt 100 %-osan – a többi átengedik. Ezáltal a gerjesztő fény a tükrön keresztül is becsatolható a lézerműködéséhez 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.

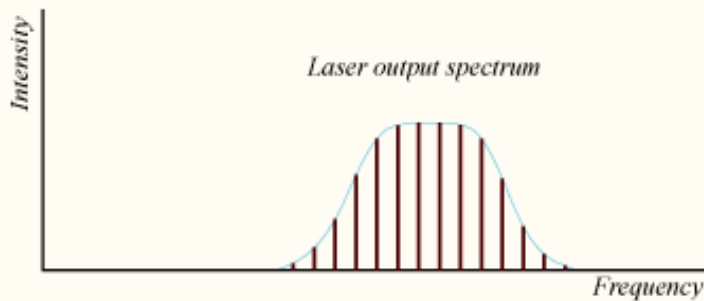
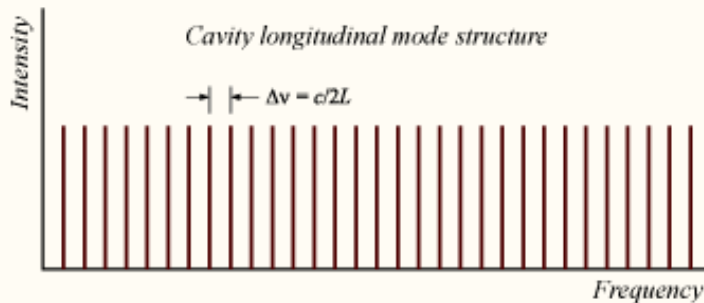
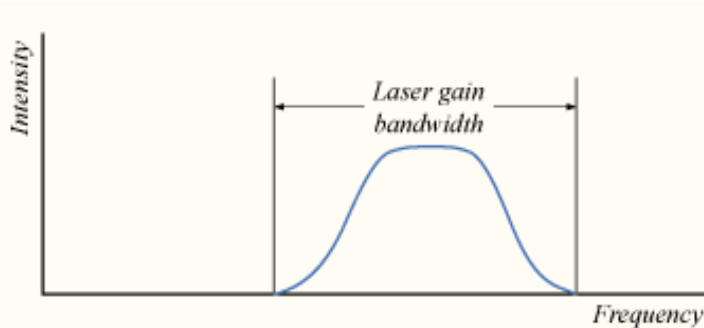
- A lézert általában **pozitívan visszacsatolt rezgéskeltő**ként és nem külső, gyenge jelek erősítésére használjuk.
- A tükörrezonátor lehet nagyon rövid is (pl. koronglézer) és igen hosszú is (pl. **szállézer vagy fiberlézer**). Ez utóbbi lézerben a megfelelően adalékolt vékony üvegszál (vagy más anyag) 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 lézeryang erősítési görbéje. Ebben a frekvencia tartományban lehetséges az erősítés indukált emisszióval. Gázlézerekben ennek a szélességét főleg a Doppler-effektus határozza meg  $\Delta f_{\text{Doppler}} \approx f_0(v/c) \approx 10^9 \text{ Hz}$

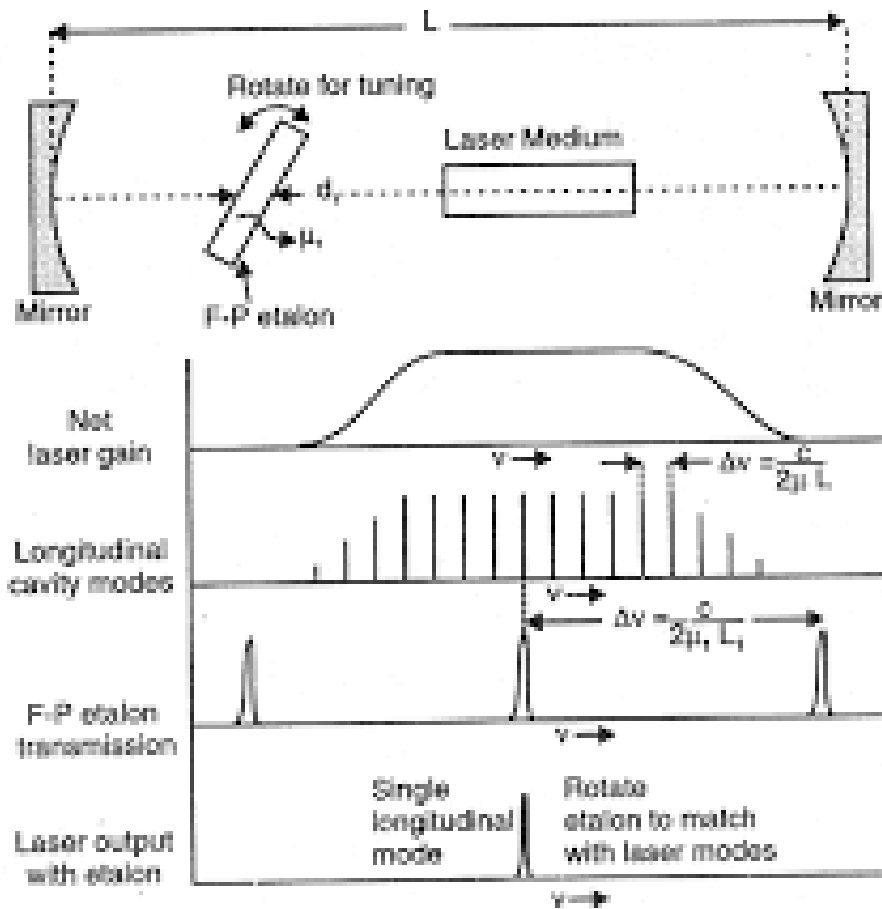
A tükörrezonátor ezeket a frekvenciákat képes erősíteni. A lézermódusok frekvencia távolsága  $\Delta f_{\text{long}} \approx 10^8 \text{ Hz}$   
egy módus kiszélesedése tipikusan  $\Delta f_{\text{lézer}} \approx 10^6 \text{ Hz}$

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).

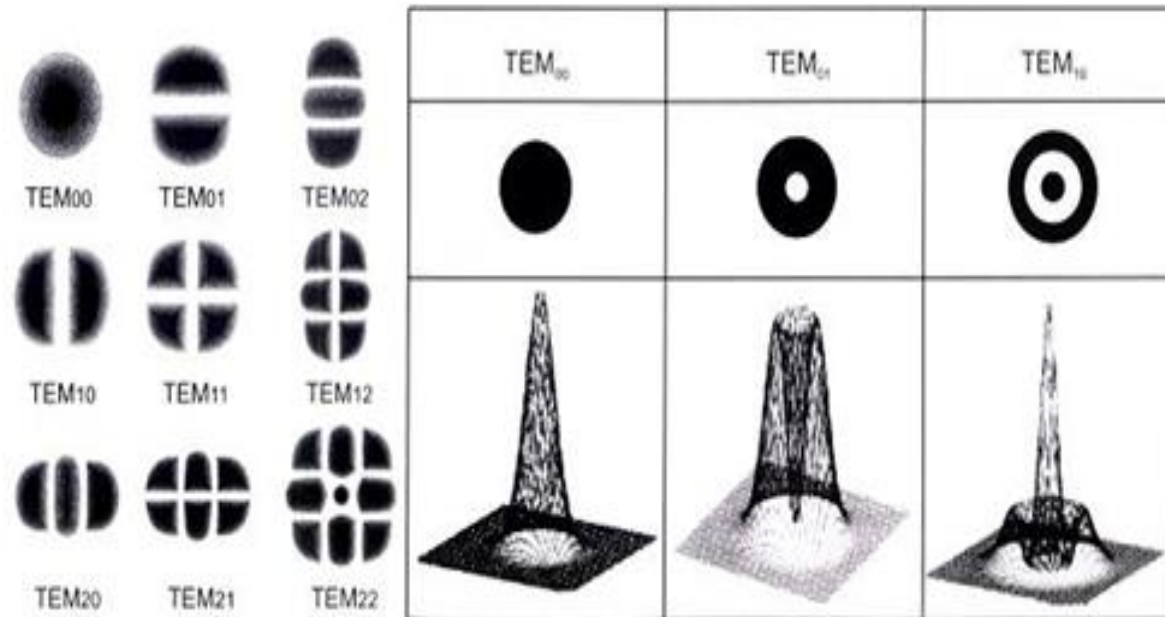
# A lézer transzverzális módusai

- 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<sub>00</sub>) 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-nyaláb**nak 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.

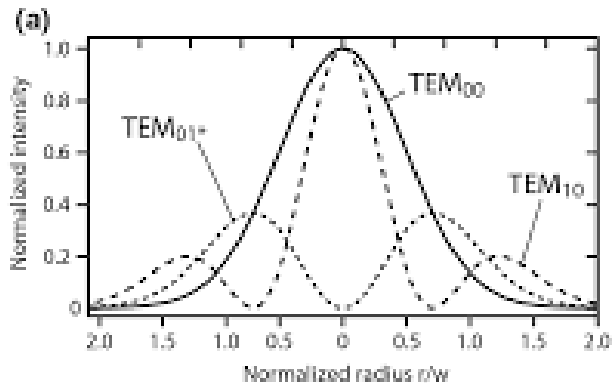
# A lehetséges transzverzális módusok két különböző geometriában



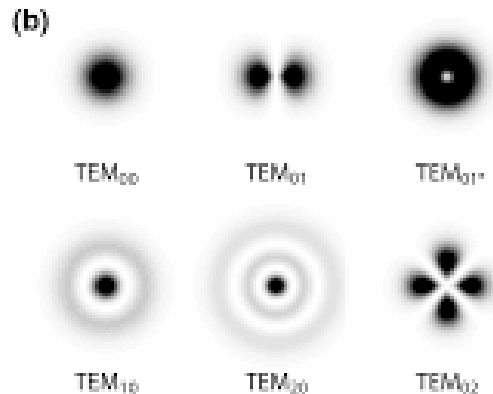
**Szögletes** és **hengeres** geometria

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

# Transzverzális módusszelekció



Az alaplópus ( $TEM_{00}$ ) jelenti a legvékonyabb nyalábot. A tükörrezonátorba helyezett megfelelő apertúrákkal – mivel azok a magasabb rendű módusokat jobban csökkentik – elérhető az alaplópusú működés.

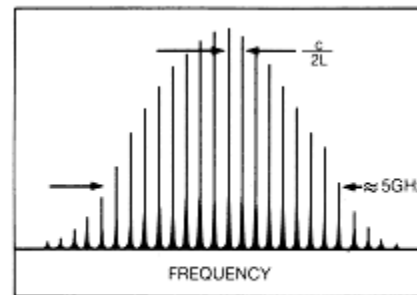
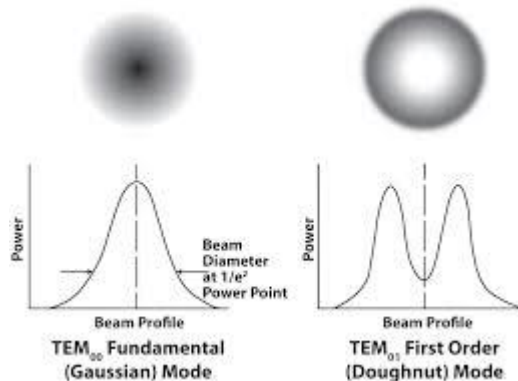


Nagy erősítésű lézerek esetén célravezetőbb lehet az instabil rezonátor, amelyből a magasabb rendű módusok hamarabb kiszóródnak.

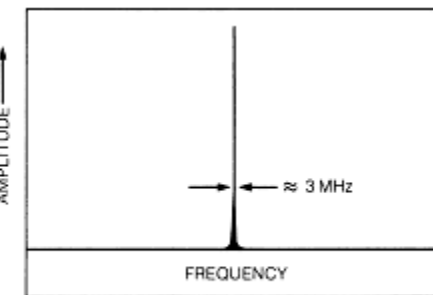
Az alaplópusú működés biztosítása mindenképpen nagy teljesítmény veszteséget jelent.

# 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 **alpmódusban** 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.***



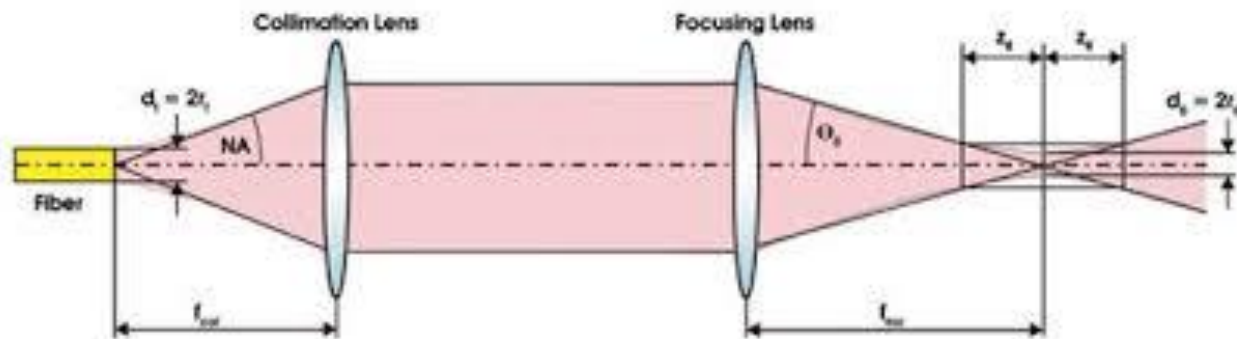
Normal multilongitudinal mode distribution of typical ion laser



Single longitudinal mode (or single frequency) output of ion laser using an etalon

## 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 alpmódusú (TEM<sub>00</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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<sup>-12</sup> s) impulzusidő esetén a csúcsteljesítmény akár **a 10<sup>14</sup> W-ot is elérheti** (vö. a világ elektromos energia termelése 10<sup>12</sup> W nagyságrendű).
- A jól fókuszált lézernyalábban különösen nagy teljesítménysűrűség lehet. Egy 1 kW-os lézernyalábot egy 10 μm<sup>2</sup>-es foltra fókuszálunk, akkor az 10<sup>14</sup> W/m<sup>2</sup> teljesítménysűrű-séget 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 (10<sup>12</sup>) is felülmúlhatja (a Nap sugárzásának 10<sup>14</sup> Hz széles a spektruma).

# Ellenőrző kérdések

Válasszuk ki a kakukktojást!

- A) transzverzális alapl módus
- 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