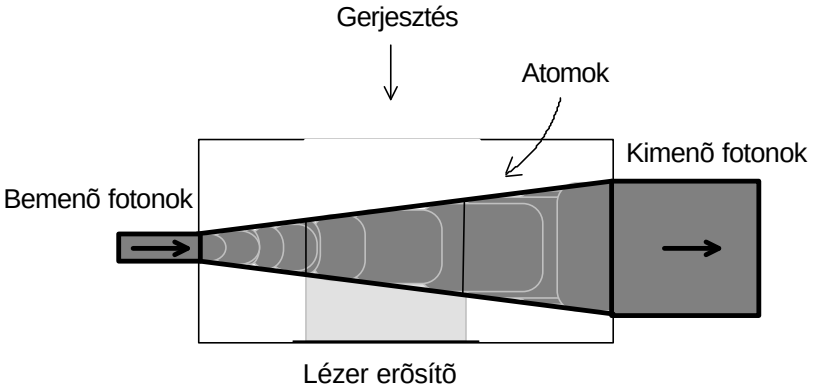
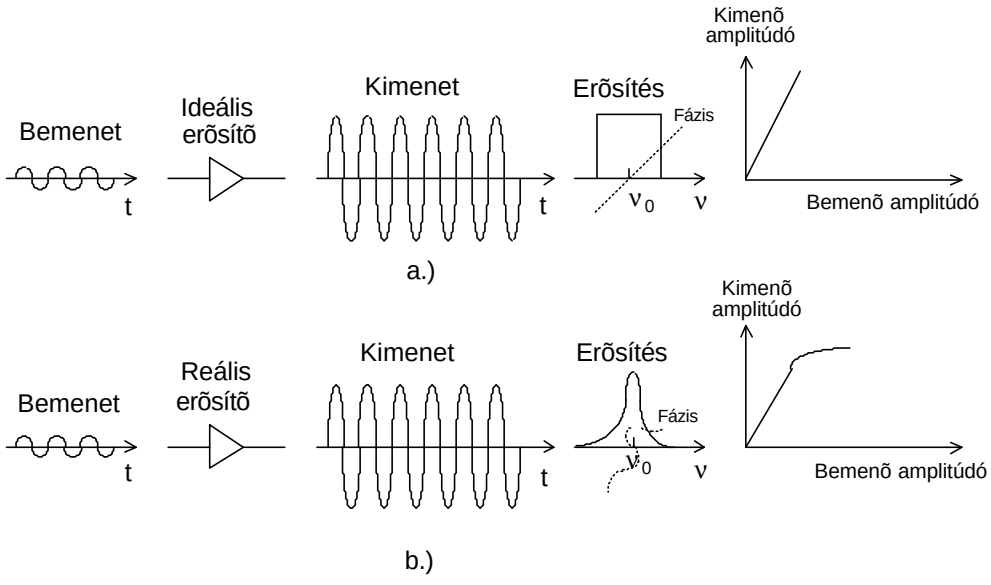
3. Koherens optikai erõsítõ

Ahhoz, hogy egy közegben egy adott átmeneten fényerõsítést hozzunk létre indukált emisszióval - nem egyensúlyi betöltöttséget (azaz az egyensúlyi betöltöttséggel ellentétes betöltöttséget vagy populáció inverziót, azaz a nagyobb energiájú szinten nagyobb betöltöttséget) kell létesíteni. Ebben az esetben az átmenetnek (lásd (6) összefüggést) megfelelõ frekvenciájú fotonnyaláb a nem egyensúlyi állapotban lévõ közegen áthaladva koherensen fog erõsödni.



3.1 ábra Koherens erõsítõ létrehozása. A gerjesztés hatására a nem egyensúlyi állapotban lévõ atomok indukált emissziós fénykibocsátása a belépõ fotonok koherens erõsödését eredményezi.

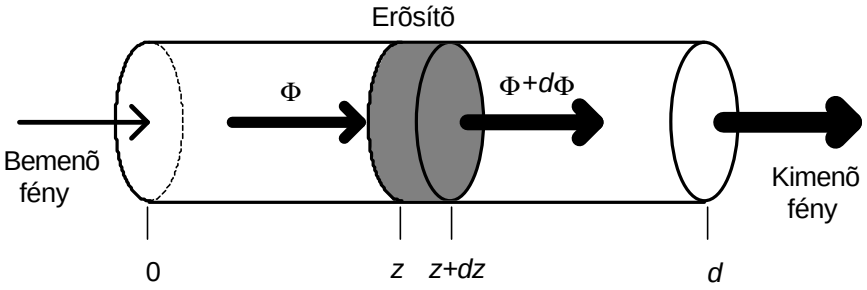
Egy ideális erõsítõ a bemenõ harmonikus jelet úgy erõsíti, hogy annak frekvenciája változatlan marad, amplitúdója lineárisan nõ, fázisa a frekvencia lineáris függvényeként változik és az erõsítés egy megadott frekvenciasávban állandó. Ezzel szemben a valóságban a reális erõsítõ frekvenciafüggõ erõsítésével és fázistolásával jellemezhetõ. Az erõsítés csak kis amplitúdójú bemenõ jelek esetén lineáris és egy adott jelszint felett pedig telítõdik (3.2 ábra).



3.2 ábra Ideális és reális erõsítõ összehasonlítása.

3.1 Frekvenciafüggõ erõsítés

Legyen a gerjesztett állapotú közegbe belépõ fotonnyaláb z irányban terjedõ ν frekvenciájú monokromatikus síkhullám. A fotonnyaláb az intenzitással vagy a fluxussûrûséggel.



3.3 ábra A fluxussûrûség változása erõsítõ közegen való áthaladáskor.

A közeg gerjesztett állapota az E_2 szint, a kiválasztott energiaátmenet a $2 \rightarrow 1$ szintek közötti, a rezonanciafrekvencia a (6) különbségnek megfelelõen ν_0 és N_1, N_2 az egységnyi térfogatban lévõ atomszám az adott energiaszinteken. Számítsuk ki a közeg egységnyi hosszának frekvenciafüggõ $\gamma(\nu)$ erõsítését.

A gerjesztett közeg és a $\Phi(z)$ fluxussûrûségû elektromágneses tér között lejátszódó kölcsönhatási folyamatok:

- abszorpció, $N_1 W_i$ az elnyelt fotonszám egységnyi idõben és térfogatban, következmény: $\Phi(z)$ gyengülése,
- indukált emisszió, $N_2 W_i$ a kibocsátott fotonszám egységnyi idõben és térfogatban, következmény: $\Phi(z)$ erõsödése,

az $(N_2 - N_1)W_i$ különbség pozitív vagy negatív volta dönti el, hogy a közeg erõsítõ vagy gyengítõ lesz. A spontán emisszió, mely szintén jelen van, az erõsítés szempontjából nem játszik szerepet, az erõsítõ zaját eredményezi. Az $N = N_2 - N_1$ különbség az inverziósûrûség. Ha $N > 0$, a közeg erõsíti, ellenkezõ esetben gyengíti a belépõ fénynyalábot. Egységnyi hosszúságú közegben a fluxussûrûség megváltozása felírható az inverziósûrûséggel és az indukált folyamatok valószínûségével:

$$d\Phi = NW_i dz \tag{15}$$

$$\frac{d\Phi}{dz} = NW_i = N\sigma(\nu)\Phi(z), \tag{16}$$

$$g(\nu) = N\sigma(\nu) \tag{17}$$

ahol $\gamma(\nu)$ az egységnyi hossz erõsítése. Megoldva (15) - öt

$$\Phi(z) = \Phi(0)e^{\gamma(\nu)z}, \tag{18}$$

$$I(z) = h\nu\Phi(z) = I(0)e^{\gamma(\nu)z},$$

z szakasz megtételével a fluxussûrûség vagy az intenzitás is exponenciálisan növekszik. A valóságban, mint látni fogjuk, az egységnyi hossz erõsítése függ a

fluxussûrûségtõl, ezért a fluxussûrûség differenciálegyenletének a megoldása nem adható meg ilyen egyszerûen!

Az egységnyi hossz erõsítésének frekvenciafüggését a hatáskeresztmetszet frekvenciafüggése adja. Homogén közeg esetén a hatáskeresztmetszet (11) azaz Lorentz -alakú, inhomogén közegben pedig (12) azaz Gauss-alakú lesz.

3.2 Gerjesztési folyamatok

A gyakorlatban a gerjesztés (pumpálás) módja lehet: lámpa, kisülés vagy áram, vegyi folyamat, egy másik lézer, stb. A gerjesztéseket két fõ csoportba szokás osztani: optikai és elektromos gerjesztések. Optikai gerjesztés során egy nagyteljesítményû fényforrás fényét abszorbeálja az aktív anyag, s így jön létre nem egyensúlyi állapot pl. szilárdtest lézerekben, ahol az atomi nívók sávokat hoznak létre, így a pumpálás széles sávban lehetséges; vagy folyadék (pl. festék) lézerekben. De lehetséges lézerrel is gerjeszteni lézert. Elektromos gerjesztés intenzív elektromos kisüléssel vagy árammal lehetséges például gázlézerekben, ahol a keskeny nívók optikai pumpálása nem megy, vagy félvezetõ lézerekben, ahol az árammal való gerjesztés egyszerûbb, mint optikailag pumpálni.

Optikai gerjesztés

Nagyteljesítményû inkoherens lámpa fényét megfelelõ optikai közvetítõ rendszerrel az aktív anyagba vezetik.

1.) impulzus lézereknél 450 - 1500 torr Xe vagy Kr töltetû villanólámpát használnak, ahol egy nagy kapacitású kondenzátorban tárolt elektromos energiát sütnek ki a lámpába. A kisülést egy segédelektródára adott nagyfeszültségû trigger impulzus indítja, mely elõionizálja a gázt, ezt követi a lámpa intenzív felvillanása. A fényimpulzus hosszát a kapacitás és az ellenállás szorzata szabja meg, általában 1 - 2 μs - 100 - 200 μs tartományba esik.

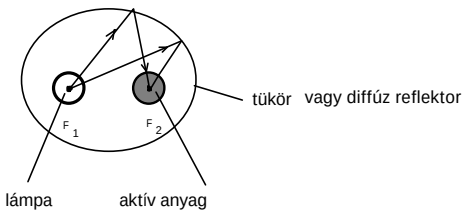
2.) folytonos (continuous wave - cw) lézereknél nagy nyomású (4000 - 8000 torr ~ 5 - 10 atm) Kr vagy W - iodine lámpát használnak.

Geometriai elrendezések

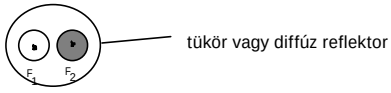
Az aktív anyag rúd alakú, melynek átmérõje 1 - 2 mm - néhány cm, hossza cm - néhányszor 10 cm tipikusan. Lehetséges elrendezések:

a.) a lámpa csigavonalban körbeveszi a rudat, s a fény közvetlenül vagy a burkoló nagy reflexiójú hengeres felületrõl visszaverõdve éri el az aktív anyagot,

b.) elliptikus elrendezés az ábra szerint,



c.) szoros elrendezés az ábra szerint,



diffúz reflektorként MgO, $BaSO_4$ port vagy fehér kerámiát használnak, ezek kicsit csökkentik a fényátvitel hatásfokát, de egyenletes megvilágítást eredményeznek,

d.) bonyolultabb elrendezések is vannak 2 lámpával elliptikus és közeli elrendezésben.

Az optikai pumpálás hatásfoka

Több tényezõtõl függ:

1.) közvetítõ rendszer hatásfoka, η_k, tipikus értéke 30-80 %,

η_k = az aktív anyagba belépõ energia / a lámpa kisugárzott energiája

2.) a lámpa sugárzási hatásfoka, η_e, tipikus értéke 25-50 %,

η_e = a kibocsátott fényenergia / a betáplált elektromos energia

3.) abszorpciós hatásfok, η_a, tipikus értéke 10-60%,

η_a = az elnyelt hasznos energia / az aktív anyagba belépõ energia

4.) kvantumhatásfok, η_q, tipikus értéke 40-50 %

A teljes hatásfok, η_t

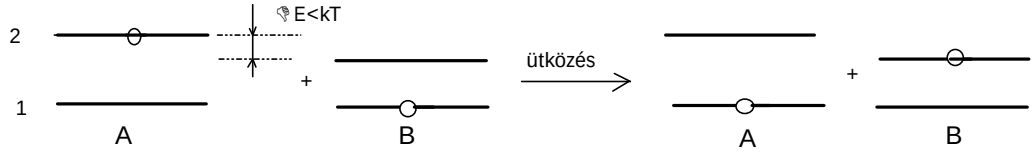
$\eta_t = \eta_k\ \eta_e\ \eta_a\ \eta_q \sim 1 - 3$ %.

Elektromos gerjesztés

Itt csak a gázkisüléssel foglalkozunk. A félvezetõ lézerekkel egy késõbbi fejezetben külön foglalkozunk. Az áram hatására a kisülésben ionok és szabad elektronok keletkeznek, melyek gyorsulnak és ütközéssel át is adják energiájukat, létrejön az atomok gerjesztése vagy ionizációja. Az elektronoknak van lényegesebb szerepük, nagyobb mozgékonyságuk miatt. Alacsony nyomású gázkisülésben cw gerjesztéssel rövid idõ alatt kialakul egy egyensúlyi energiaeloszlás az elektronokra nézve, amelynek alapján megadható az átlagos elektronenergia vagy elektronhõmérséklet. Két fõ folyamat van:

1.) egykomponensû gáz esetén az elektronütközéses gerjesztés $e + X \rightarrow X^* + e$ elsõ fajú ütközés,

2.) kétkomponensû gázban (a komponenseket jelölje A és B) rezonáns energiaátadással is lehetséges gerjesztés



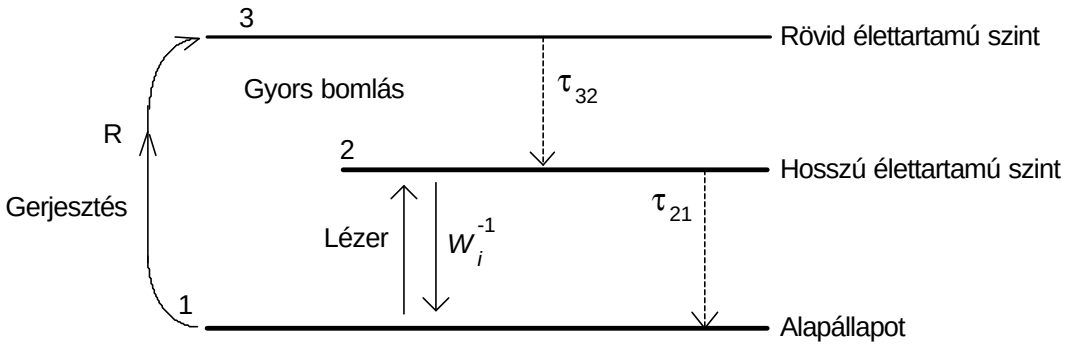
$A^* + B \rightarrow A + B^* + \Delta E$ másodfajú ütközés.

Különösen akkor jó ez a folyamat, ha az A atom 2 $\rightarrow$ 1 átmenete tiltott átmenet, vagyis az A 2-es szintje metastabil állapot, így mint egy energiatartály mûködik, s ha egyszer gerjesztõdött, hosszú ideig gerjesztve is marad. Például He-Ne lézerben a He tölti be az "A" anyag szerepét, míg a Ne a "B" anyag. A hélium egy metastabil állapota játsza a fõszerepet a Ne atom megfelelõ szintjének (He-Ne lézer felsõ szintjének) a gerjesztésében.

3.3 Három és négy nívós közegek

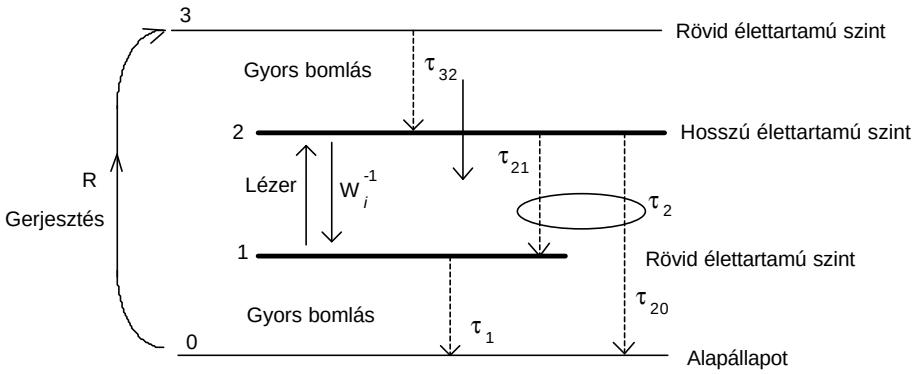
Az irodalom kétfajta erõsítõ közeget az eddigieken felül is kiemelten tárgyal. Ezek az ún. három és négy nívós közegek. A kiemelést az indokolja, hogy a gyakorlatban a lézererõsítõk egy része megfeleltethetõ a három és négy nívós közegeknek.

Az adott atomi rendszernek több nívóját kell figyelembe venni, melyekre teljesülnie kell a 3.4 és 3.5 ábrák szerinti feltételeknek.



3.4 ábra Háromnívós gerjesztési model.

Mivel az atomi szintek távolsága >> kT, (kivéve a molekulák rotációs szintjeit), ezért termikus egyensúlyban csak a legalacsonyabb szintek vannak betöltve. Ezért a 3 nívós esetben kezdetben $N_1 = N_t$, ahol a t index az összes atomot jelenti. Az 1 és 2 szintek közötti inverz betöltöttséghez $N_t / 2 + 1$ atom gerjesztése szükséges. Lehetséges olyan háromnívós gerjesztési model is, ahol a lézerátmenet a felsõ két szint között történik és a megfelelõen nagy inverziókülönbséghez csak az alsó lézerszint gyors bomlását kell biztosítani.

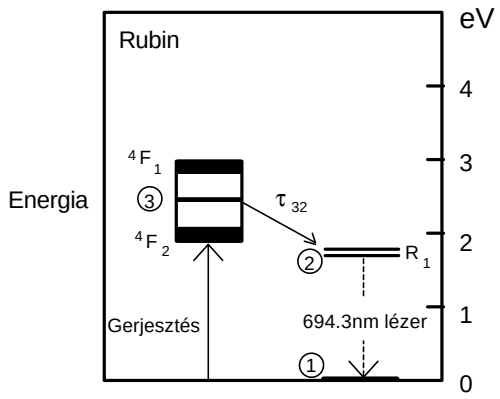


3.5 ábra Négynívós gerjesztési model.

A 4 nívós esetben már egyetlen atom gerjesztésével létrejön az inverzió az 1 és 2 szintek között, ezért ebben az esetben kevesebb betáplált energiára van szükség az inverz betöltöttség létesítéséhez.

3.4 Példák

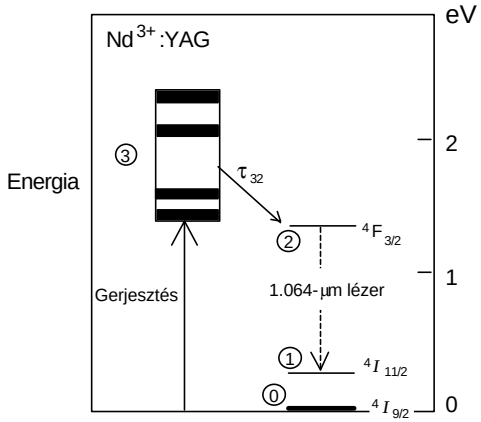
1. Klasszikus 3-nívós rendszer a rubinlézer (az elsõ lézer volt 1960-ban). A természetben elõforduló Al_2O_3 korund fekete színû kristály (ez a smirgli alapanyaga). Egykristályos szabályos változata a zafír, mely átlátszó. Krómmal szennyezve kapjuk a rubinkristályt, melyet $Cr_2O_3 + Al_2O_3$ olvadékából növesztenek. A krómdioxid az olvadékban 0,05 súlyszázalékban szerepel. Az így kapott kristály mélyvörös színe miatt kapta a rubin nevet.



3.11 ábra Rubin kristály lézermûködéshez fontos nívói.

A lézermûködés szempontjából fontos energiaszintek a háromnívós sémának felelnek meg. A rubin kristálynak kékben és zöldben két széles elnyelõ sávja van (ezek okozzák a kristály piros színét), ezeket lehet lámpával gerjeszteni, a lézerátmenetek hullámhosszai: 0,6943 μm (erõsebb átmenet) és 0,6928 μm. A 3 $\rightarrow$2 átmenet élettartama τ_{32} ~ ps nagyságrendû, a $\tau_{21} \sim t_{sp} \approx 3$ ms. Az átmenet homogén kiszélesedésû, $\Delta\nu$ = 60 GHz (300 K-en). A növesztett lézerkristály típikus méretei: 5 - 20 cm hosszú és 5 - 10 mm átmérõjû.

2. Klasszikus 4-nívós rendszer a neodímium lézer. Szintén szilárdtest lézerfajta. A Nd ionokat YAG kristályba illetve üvegbe szennyezõként beépítve a Nd ion két nívója közötti átmeneten mûködik ~ 1,06 μm körüli infravörös hullámhosszon. A lézermûködéshez szükséges energiaszintek a 3.13 ábrán láthatók.

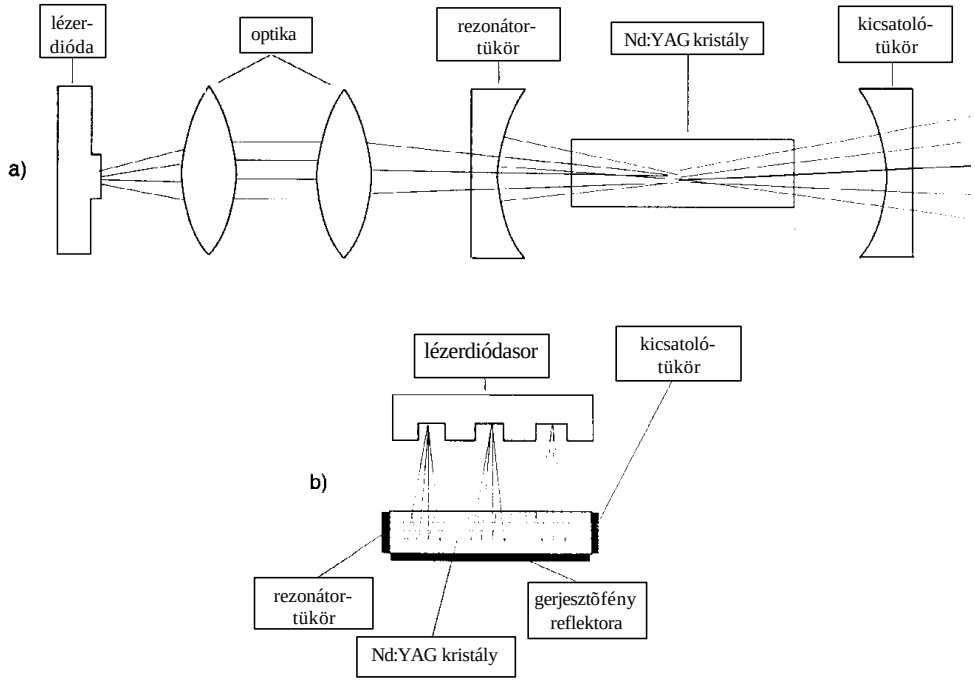


3.12 ábra Nd:YAG lézer nívói.

A 3-mal jelölt szint 4 db ~ 30 nm - es sávból áll: 0,810; 0,75; 0,58; 0,52 μm körül, melyek rövid idõ alatt ürülnek a lézer felsõ szintjére, a nívóélettartamok: τ_{32} ~ 100 ns, t_{sp} ~ 1,2 ms és τ_1~30 ns.

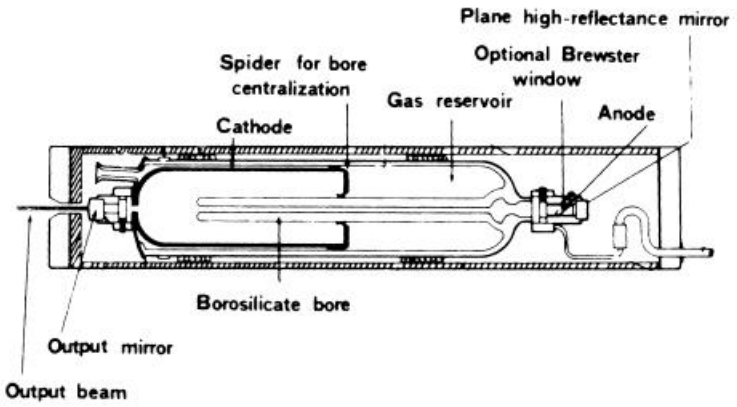
A YAG - kristályos környezetben az átmenet homogén kiszélesedésû, $\Delta\nu \approx 120$ Ghz 300 K - en, míg az üvegben a neodímium ionok szabálytalan környezete miatt az átmenet inhomogén kiszélesedésû, szobahõmérsékleten $\Delta\nu \approx 3000$ Ghz. Az üveg esetén a méretben nincs korlát. A ma ismert legnagyobb méretû lézer egy Nd:üveg lézer (NOVA lézer, melyet fúziós kisérletekhez fejlesztettek ki, 10^5 J energiájú 1 ns - os impulzust ad).

A 3-as sávok hullámhossztartományában ma már nagy teljesítményû félvezetõ lézerek mûködnek, ezért a lámpás gerjesztések helyett ma már egyre inkább a 3.13. ábra szerinti gerjesztés a jellemzõ.



3.13. ábra Új típusú elrendezések az Nd:YAG lézerek gerjesztésére lézerdiódával, a) longitudinális, b) transzverzális.

3. A 3.14. ábrán egy modern felépítésû He-Ne lézert láthatunk.



3.14 ábra Modern felépítésû He-Ne lézer.

A gáztartály kisnyomású (néhány mbar) He és Ne gázkeveréket tartalmaz. A Ne atomok gerjesztése gázkisüléssel történik. A wolfram szál anód és a tipikusan Al ötvözetből készített katód között a vastag falú kapillárisban folyik a néhány mA nagyságú áram. A kisülés beindításához hossztól függõ, de 5-10 kV nagyságú gyújtó feszültség szükséges. A 3.14. ábra szerinti elrendezésben a tükrök a kisülési csõ végére vannak ragasztva. A lézer legismertebb hullámhossza a 0,6328 μm-es, de közeli infra hullámhosszai (1,15 és 3,39 μm), illetve zöld, sárga és másik piros hullámhosszai is ismertek.

4. Néhány lézerátmenet jellemzõi

Közeg	λ[μm]	σ_0[cm^2]	t_{sp}	$\Delta\nu$	H hom. I inhom.	n
He-Ne	0,6328	$1\cdot10^{-13}$	0,7 μs	1,5 GHz	I	~1
Rubin	0,6943	$2\cdot10^{-20}$	3 ms	60 GHz	H	1,76
Nd^{3+}-YAG	1,064	$4\cdot10^{-19}$	1,2 ms	120 GHz	H	1,82
Nd^{3+}:üveg	1,06	$3\cdot10^{-20}$	0,3 ms	3THz	I	1,5
Er^{3+}:üvegszál	1,55	$6\cdot10^{-21}$	10,0 ms	4 THz	H/I	1,46
Rodhamin 6G	0,56-0,64	$2\cdot10^{-16}$	3,3 ns	5 THz	H/I	1,33
Ti^{3+}:Al_2O_3	0,66-1,18	$3\cdot10^{-19}$	3,2μs	100 THz	H	1,76
CO_2	10,6	$3\cdot10^{-18}$	2,9 s	60 MHz	I	~1
Ar^+	0,515	$3\cdot10^{-12}$	10,0 ns	3,5 GHz	I	~1