

1. Lézerek

I. A lézerek alaptulajdonságai

1960, *Maiman* (USA): az első lézer (impulzus rubin lézer)

- előzőleg már működött az ammónia mézer (1958)

1962: folytonos üzemű lézerek

Magyarországon: He - Ne laser ($\lambda=1,15 \mu\text{m}$) 1963-ban (KFKI, *Csillag L.*)

LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

A lézerfény tulajdonságai:

- monokromatikus ($\Delta\lambda \geq 0,01 \text{ \AA}$)
- kis divergencia ($\Delta\alpha \geq 0,5 \text{ mrad}$)
- koherens, azaz interferenciára képes, mert

$\xi_{\text{longitud.}} \sim 10 \text{ m}$, és

$$\xi_l = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \Delta\lambda}$$

$\xi_{\text{transzv.}} \sim 0,5 \text{ m}$

mérése: $\xi_l \rightarrow$ Michelson - interferométer

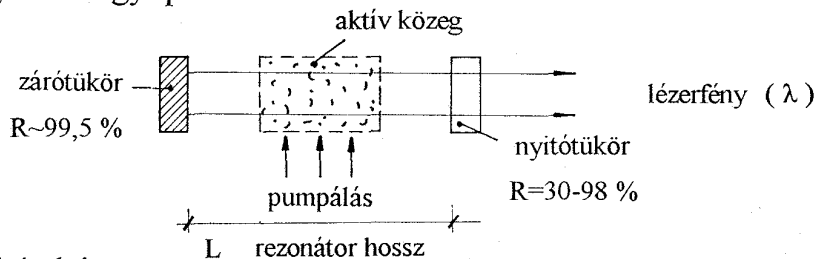
$\xi_t \rightarrow$ Young - interferométer

Következmény: \rightarrow nagy fénysűrűség !

Fényforrás	Teljesítmény P (W)	Sávszélesség $\Delta\lambda$ (nm)	Térszög $\Delta\alpha$ steradián	P/($\Delta\lambda \cdot \Delta\alpha$) (W/nm·sr)
Hg lámpa zöld (546 nm) vonala	1	0,1	4π	1
He - Ne lézer	3 mW	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-6}	10^6
Ar lézer (egy vonalon)	0,5	10^{-4}	10^{-6}	$5 \cdot 10^9$
Rubínlézer (1J / 10ns)	10^8	1	10^{-4}	10^{12}

A lézerek felépítése:

- erősítő közeg (gáz, folyadék, szilárd anyag)
- rezonátor, melyben a visszacsatolást biztosító elem:
tükrök, rács vagy prizma.

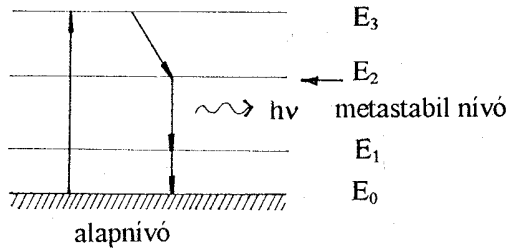


A lézerműködés feltételei:

- 1) populáció inverzió (3 - 4 nívós rendszer)
- 2) metastabil nívó létezése
- 3) indukált emisszió létrejötte

Következménye: fényerősítés, azaz a Lambert - Beer törvényben

$$I = I_0 e^{-Kx}, \text{ ahol } K < 0 \text{ lesz!}$$



$$E_2 > E_1; \quad E_2 - E_1 = h\nu$$

$N_2 > N_1$, ha van lézerműködés!

n_a - abszorbeált fluxus *foton/s.cm³*

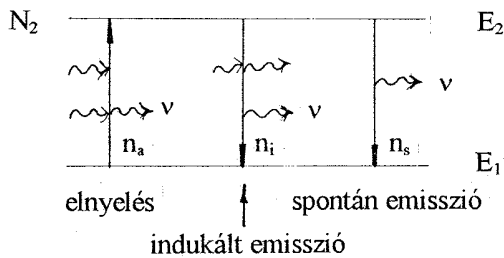
n_i - indukált emisszió fotonszáma

n_s - spontán emisszió fotonszáma

ρ_ν - beeső fotonter sűrűsége

N_1, N_2 - az 1. ill. a 2. állapotban lévő atomszám (*atom/cm³* érték)

$B_{21} = B_{12}$ - átmeneti valószínűség



$$n_a = N_1 \cdot B_{12} \cdot \rho_\nu$$

$$n_i = N_2 \cdot B_{21} \cdot \rho_\nu$$

$$n_s = N_2 \cdot A_{21}$$

$$\text{ahol } A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$$

Ha σ_{12} az abszorpciós, σ_{21} az ind. emissziós hatáskeresztmetszet (*cm²-ben*) és $\sigma_{12} = \sigma_{21} = \sigma$, a közegben terjedő síkhullámra az n_0 foton/sűrűség hosszegységre eső változása

$$dn = n_i - n_a = -\sigma n_0 (N_1 - N_2) > 0 \quad \rightarrow \text{az erősítés,}$$

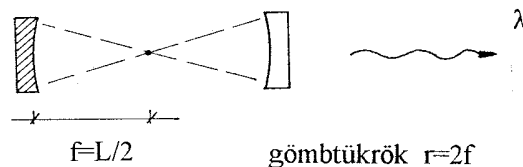
és az abszorpciós együttható

$$K = -\frac{dn}{n_0} = \sigma(N_1 - N_2) < 0 \quad \text{és } B = \frac{c}{\eta \nu h} \sigma, \text{ ahol } \eta \text{ a közeg törésmutatója.}$$

A visszacsatolás növeli a ρ_ν foton/sűrűséget.

A spontán emisszió $A \sim \nu^3$ az UV -ban jelentős lehet.

Visszacsatolás: konfokális tükörrendszerrel a legjobb.



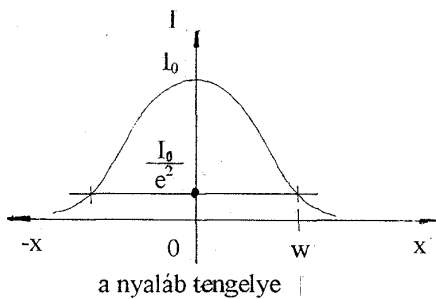
A rezonátor: *Fabry - Perot* interferométer (mely két, egymástól 0,1 - 1 mm távolságban elhelyezett párhuzamos, $R \sim 80\%$ tükröző felületből áll). Ennél maximális az áteresztés, ha $2L/\lambda = n$ (ahol n egész szám).

Módusok:

a) Transzverzális (Transversal Electro Magnetic, TEM) módusok
 - a lézer fényfoltjában (az xy - síkban) pöttyök látszanak

TEM ₀₀ •	TEM ₁₀ •
TEM ₀₁ ••	TEM ₁₁ ••
TEM ₀₂ •••	TEM ₁₂ •••

E pöttyökben a fény polarizációja, és kicsit a λ hullámhossz értéke is különböző lehet. Felhasználás szempontjából legjobb a TEM₀₀ módus, ekkor az intenzitás eloszlás az xy síkban Gauss - függvény alakú.



$$I = I_0 e^{-\frac{2x^2}{w^2}} \text{ és } 2w - \text{ a nyalábátmérő.}$$

Ez elérhető hosszú, vékony rezonátorokban a tükrök és Brewster - ablakok megfelelő jusztlásával.

Az ehhez tartozó szögértékek (a lézertől nagy távolságban mérve) a nyalábdivergenciát adják meg, mely 1 mrad nagyságú.

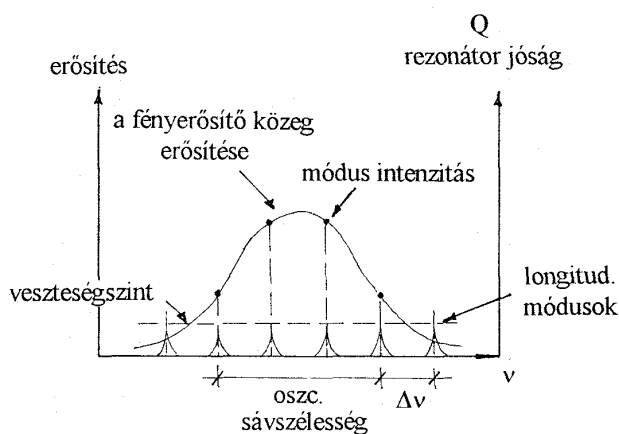
b) Longitudinális módusok

A *Fabry - Perot* rezonátor akkor működik, ha a síkhullámú fény fázisa a $2L$ út megtétele után $n \cdot 2\pi$ -t változik, azaz

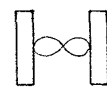
$$2L = n\lambda \quad (n=1,2,3 \dots, \text{általában } 10^4 - 10^5 \text{-es érték})$$

Ekkor a longitudinális módusok közti frekvencia különbség:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (\text{tipikusan } \Delta\nu = 1 \text{ kHz} - 100 \text{ MHz})$$



Egymódusú lesz a lézer, ha egy hangolt *Fabry - Perot etalon* tesznek a rezonátorba.



Ha L kicsi (1mm),
 ν_0 a $\Delta\nu$ nagy (100GHz).

Az oszcillációs sávszélesség a nívók $T > 0$ hőmérsékleten történő kiszélesedése miatt nem δ -függvény (ez a természetes vonalszélesség). Gázokban tipikus értéke 1 MHz

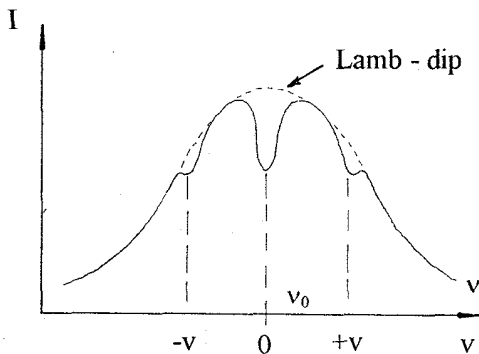
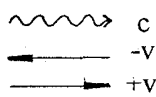
Gáz- és folyadéklézerekben fellép a lézervonalak Doppler - kiszélesedése.
Oka: a magashőmérsékletű gázok Brown - mozgása.

Ezek sebessége Maxwell -eloszlású. A fotonnyalábbal párhuzamosan $+v$ sebességgel haladó atomok gerjesztéséhez $\nu_0 \left(1 + \frac{v}{c}\right)$ frekvencia, a vele ellentétes irányban $-v$ sebességgel *haladó* gerjesztéséhez $\nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right)$ frekvencia kell.

Az eloszlás félszélessége (FWHH = *Full Width at Half Height*):

$$\Delta\nu_{FW} = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2RT \ln 2}{M}}$$

(M -az aktív atom tömege; R -egyetemes gázállandó; T - gázhőmérséklet)



Egy adott $\pm v$ sebesség esetén az emissziós görbe. Ez a gázatomok energia szerinti eloszlását adja. $\nu=0$ -nál lecsökkent a gerjesztett atomok száma, mert ezeket mindkét irányú ($\pm v$) fény kisüti ill. gerjeszti. Szélessége a természetes vonal-szélesség (kb. 1 MHz).

Felhasználható: stabilizálásra.

Doppler - félszélesség: ~ 1 GHz
 (0,01 nm)

II. Lézerfajták

Halmazállapot szerint:

- gáz, gőz
- szilárdtest
- folyadék

Az $I(t)$ szerint:

- folytonos (cw) üzemű
- impulzus

A visszacsatolás minősége szerint:

- külső vagy belső tükrös
- elosztott (DFB)

Különleges lézerek:

- excimer
- kémiai (gázdinamikus)
- nukleáris
- szabad elektron (FEL)
- 2D és 3D lézer

- hangolható lézerek

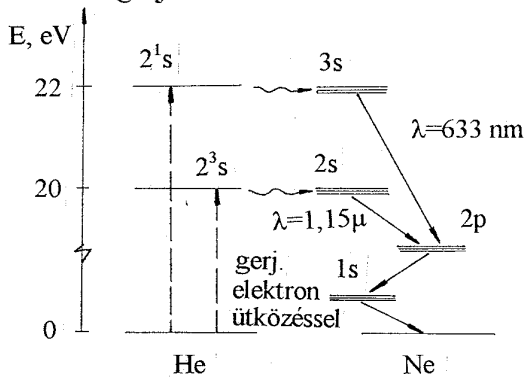
1) Gázlézerek

- atomos gáz (He - Ne)
- iongáz (Ar⁺, Kr⁺)
- molekulagáz (CO₂, N₂)
- nemesgáz - fémgőz (He - Cd)
- TEA (*Transversally Excited Atmospheric*, pl. CO₂, N₂)

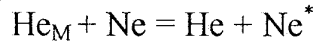
a) A He - Ne lézer

Az egyetlen atomos gázlézer, mely a láthatóban ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) sugároz.

Mechanizmus: a ritkított (1-5 torr nyomású), 7:1 arányú, He:Ne gázkeverékben elektromos kisülést hozunk létre, melyben a He atomok a 2³S és 2¹S metastabil állapotba kerülnek. Ezek másodfajú ütközéssel átadják energiájukat a lézeraktív Ne atomoknak.

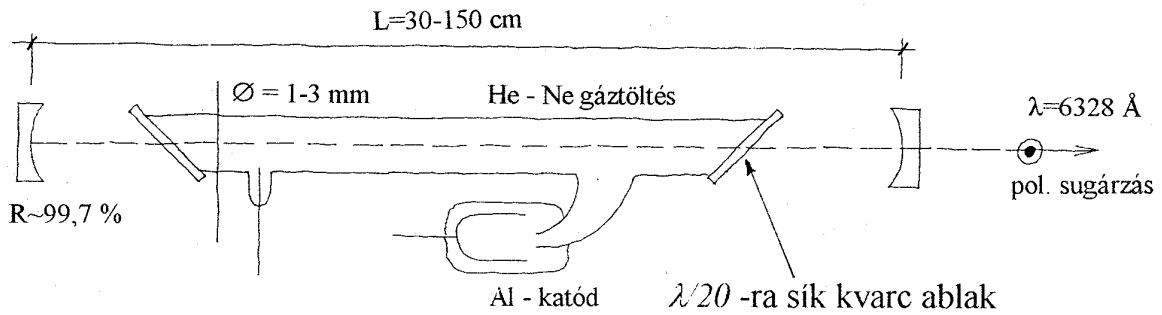


Energiaátadás He - Ne ütközéssel:



Kiürítés spontán sugárzással.

Sötét átmenet (a falnál).



$\lambda/20$ -ra sík kvarc ablak
Brewster - szögben ($\text{tg}\alpha = n$)
BK-7 üvegre $n=1,52; \alpha=56,3^\circ$
Erősítés: $1,02-1,05 \text{ m}^{-1}$

Egy $L = 0,5 \text{ m}$ hosszú csőben 1000x -es reflexió (500x-os körbefutás) esetén: 10^{10} x-es erősítés

Az energiahatásfok alacsony: $\geq 0,1\%$

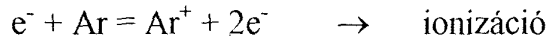
A leggyakrabban használt lézer a technikában, tudományban. Viszonylag olcsó, megbízható (élettartama ~ 3000 óra). Külön hűtést nem igényel.

Tápegysége kicsi: 2-4 KV/5-15 mA egyenáram. Ára: 5 mW, TEM₀₀ módus ára ~1000 DM.

b) Iongáz lézerek (Ar⁺, Kr⁺)

Az Ar⁺ lézer a leggyakrabban használt multihullámú (hangolható), viszonylag nagy teljesítményű gázlézer (1964-66).

Mechanizmus: elektronütközéssel két lépésben



A lézerátmenet felső nívóját csak két lépésben lehet gerjeszteni, ezért Ø 2-3 mm cső esetén 20-40 A áram szükséges. Lézerátmenet vörös - zöld - kék vonalakon lehetséges. Erős vízhűtést, nagyméretű tápegységet, különleges rezonátorcső anyagot (grafit, BeO) igényel.

5 W -os készülék ára kb. 40 000 \$ (Spectra Physics).

5 W-os Spectra Physics lézer vonalainak intenzitása W-ban

λ (nm)	Int. (W)	λ (nm)	Int. (W)
1090	0,04	476,5	0,60
528,7	0,30	472,7	0,25
514,5	1,70	465,8	0,13
501,7	0,30	457,9	0,30
496,5	0,60	454,5	0,10
488,0	1,30		

Kr⁺ lézer: hasonlóan működik, vonalai a vörös - sárga tartományban vannak.

c) Molekulagáz lézerek (CO₂, N₂)

CO₂ lézer: CO₂:N₂:He gázkeverék 5-15 torron. Gázkisülés. A metastabil N₂ molekulák ütközéssel gerjesztik a CO₂ vibrációs - rotációs állapotait.

Sugárzás: $\lambda = 10,6 \pm 0,6 \mu\text{m}$ hullámhosszon. Sok egymáshoz közeli vonal.

P_L= 1-1000 W, ezért ipari célra elsősorban ezeket használják.

N₂ lézer: Csak impulzus üzemben működtethető. $\Delta t \sim 1 \text{ ns}$ (gyorsan kiürülő nívó, elektrongerjesztés). $\lambda=337 \pm 1 \text{ nm}$. Szupersugárzó: 1 tükörrel is megy. Festéklézerek gerjesztésére is használják, mert olcsó.

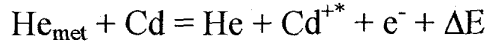
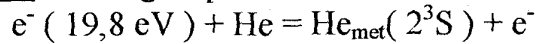
d) Nemesgáz - fémgőz lézerek (He - Cd)

Ezek is ionlézerek. A gyakorlatban csak a He - Cd⁺ terjedt el. Kék és UV tartományban működik, $\lambda=441,6$ és 325 nm. P=10-50 mW. Nagy élettartam (kb. 1000 óra), de időben csökkenő teljesítmény (1967).

Felépítés: Ø5 mm kvarc cső, 2 torr He. A 200 °C -os kályharészben 10⁻² torr nyomású Cd gőz keletkezik. A kályha hőmérsékletét szabályozni kell.

A csőben $i \sim 100$ mA áram folyik, külön hűtést nem igényel, a konvekciós hűtés elegendő.

Mechanizmus: Penning - típusú ionizáció

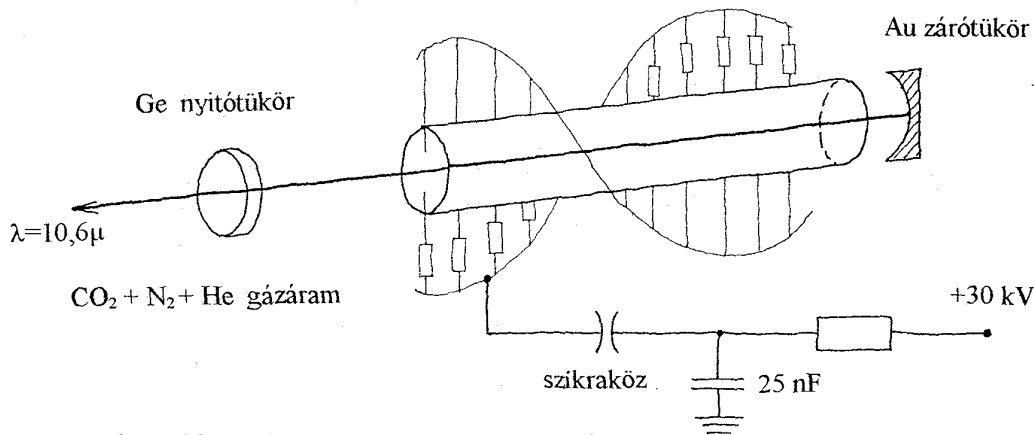


($\tau(\text{He}_{\text{met}}) \sim 10 \mu\text{s}$). Ütközéses ionizáció és gerjesztés.

e) TEA lézerek (CO_2 , N_2)

Atmoszférikus nyomású gázkeverék áramlik a kisülési csőben, melyet a cső tengelyére merőlegesen áramimpulzusokkal gerjesztenek: $\Delta t \sim 1 \mu\text{s}$. Elektron-injektálással is lehet gerjeszteni, ennek iránya merőleges a cső tengelyére. Kimenő teljesítmény: $10\text{-}100 \text{ J/impulzus}$. Ismétlési frekvencia $\nu=1\text{-}100 \text{ Hz}$. Anyagmegmunkálási célokra kiválóan alkalmas.

Haladóhullámú gerjesztés:



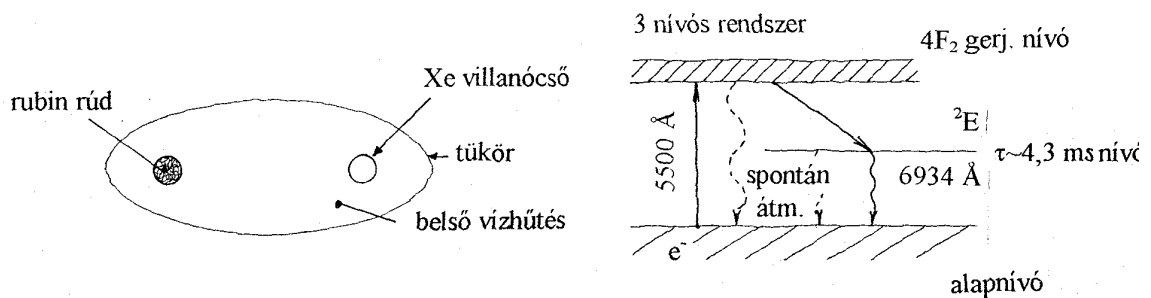
2) Szilárdtest lézerek

Hűtési problémák miatt elsősorban impulzus üzemben működtethetők. Igen nagy ($1\text{-}100 \text{ J/imp.}$) is működhetnek. A lézernívók sávszélessége általában nagyobb, mint a gázlézerekénél, mert a szennyezési nívókat (Cr^{3+} , Nd^{3+}) az atomok közötti kölcsönhatások kiszélesítik.

Ennek előnye: igen rövid ($1 \text{ ns}\text{-}10 \text{ fs}$) lézerpulzusok előállításának lehetősége, mert Heisenberg szerint $\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$, ahol ΔE - a nívó sávszélessége és Δt - az átmenet (impulzus) időtartama.

a) A rubinlézer szerkezete:

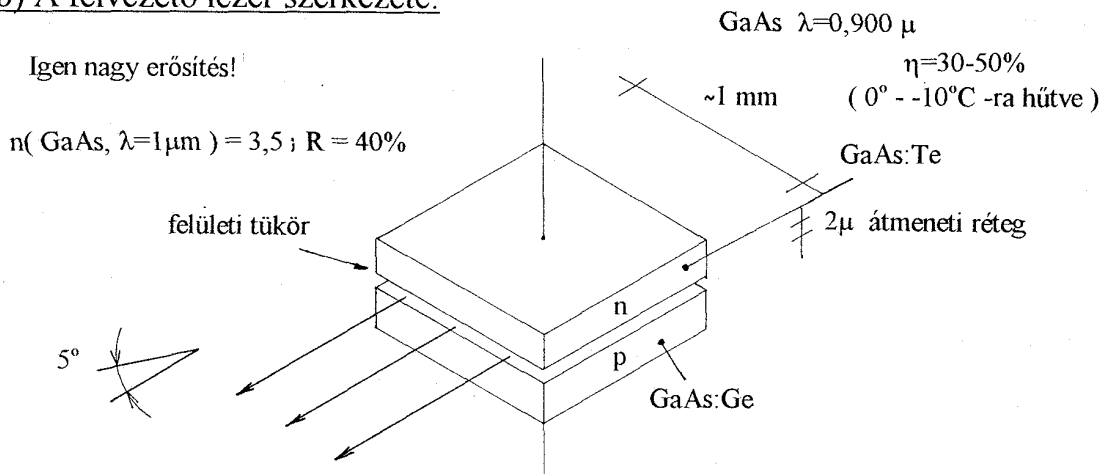
Ez volt az első lézer (Maiman, 1960).



Rubin: $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ ($\sim 0,05$ at.%)

Hatásfoka: 0,1-0,3 %. Ismétlési frekvencia < 5 Hz. 77 K -en lámpával folytonosan is gerjeszhető.

b) A félvezető lézer szerkezete:



Meghajtó áram: 0,5-10 A. Hűtés: Peltier-elemmel.

III-V. oszlopbeli elemek vegyületeiből dopolással készülnek *CVD* (*Chemical Vapour Deposition*) technikával. *Heteroátmenetes* (pl. GaAs-GaAlAs(p) -GaAlAs(n)-GaAs) lézernél kisebb küszöbáram kell.

Ára: 1000 DM ($P \sim 0,5$ W)

c) Nd^{3+} :YAG lézerek

YAG (*Yttrium Aluminium Gránát*, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) alapanyagban $\sim 0,1-0,5$ at.% Nd szennyezés. $\lambda = 1,064\mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 10$ nm sáv szélességű lézer működés.

Felépítése azonos a rubinlézérével. *Gerjesztés*: fényel.

Hatásfok: $\eta = 1-3$ % (4 nívós rendszer). Ismétlési frekvencia: $\nu \leq 1$ kHz.

Ha a hordozó foszfát üveg \rightarrow olcsóbb, jobb hatásfok, de kisebb ismétlési frekvencia.

Újabban: $\lambda = 809$ nm félvezető lézerral történő folytonos vagy impulzus pumpálás. Folytonos üzemben $P_{ki} < 50$ mW, $\eta \sim 15$ % . A jó hatásfok oka: szelektív gerjesztés az anyag elnyelési sávjában.

d) Ti:zafír lézer

Al_2O_3 (zafír) hordozóban Ti^{3+} szennyező. $\lambda=750-950$ nm, megfelelő visszacsatoló elemmel (pl. rács) hangolható az adott tartományban.

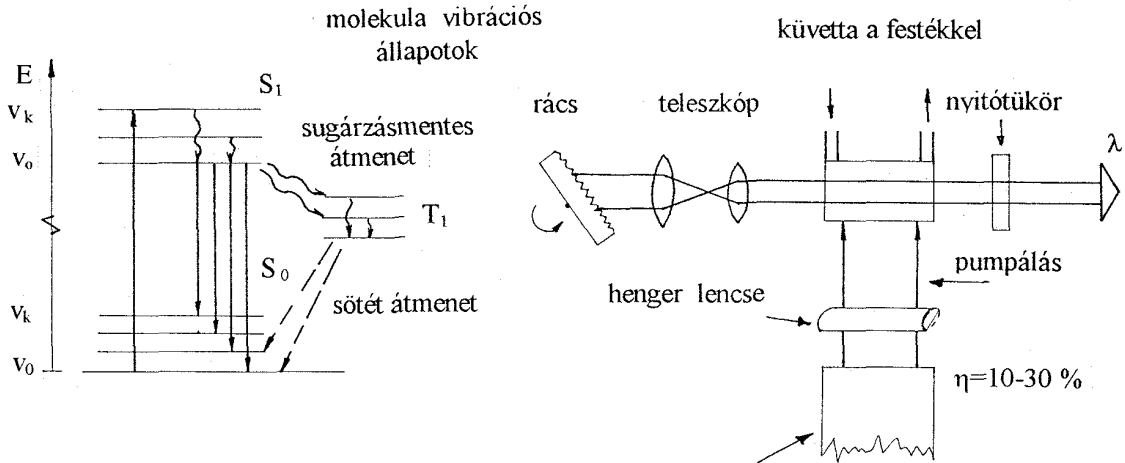
3) Folyadéklézerek - a festéklézerek

Az egyetlen széles sávban ($0,3-1\mu\text{m}$) hangolható lézerrendszer, mely cw és imp. üzemben is használható. Megfelelő technikával $\tau \sim 10$ fs is elérhető

(JATE Optikai Tanszéke, Szeged). A hangolás festékek cseréjével (stilben, kumarin, rodamin stb.) és valamilyen diszperzív elemmel történik. Egy festék átfogása 50-150 nm.

Tipikus energianívó vázlat:

Felépítés:



A triplet állapot élettartama nagy, ez elviszi az energiát, ezért a folyadékot cw módban áramoltatni kell!

Ar⁺, Kr⁺, N₂ vagy excimer lézer

A legfontosabb folytonos üzemű lézerek

Típus	λ μm	Teljesítmény mW	Nyaláb átmérő mm	Szét- tartás mrad	Hatás- fok %	Megjegyzések
He-Ne	0,633	1-50	1 - 3	0,5 - 5	> 0,1	Olcsó - leggyakoribb fajta
Ar ⁺	0,46- 0,51	10-5000	1 - 5	0,5 - 5	> 0,1	Holografálásra Drága, de megbízható
He-Cd ⁺	0,3250 0,4416	1-50	1 - 2	0,5 - 5	0,1	Kis telj., holografálásra
CO ₂ -N ₂ - -He	10,6 ^{+0,6}	10 ³ -10 ⁶	1 - 25	2 - 10	10	Anyagmegmunkálás Orvosi alkalmazás
Nd:YAG	1,064	10 ³ -10 ⁵	3 - 7	1 - 10	1	Nagy telj., kis méret
festék	0,45- 0,70	10-500	0,5	1 - 3	1-25	Ar ⁺ lézer pumpálással hangolható
GaAs (félvez.)	0,65- 1,6	1000	10 ⁻³ - 10 ⁻²	100	30-50	Kicsi, olcsó Könnyen modulálható

A legfontosabb impulzus üzemű lézerek

Típus	λ μm	Csúcs- telj. W	Imp. időtár- tam s	Imp. ener- gia J	Ismétl. frek- vencia Hz	Nyal. át- mérő mm	Szét- tar- tás mrd	Ha- tás- fok %	Megi.
N ₂	0,337	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁻⁸ - 10 ⁻⁹	0,001	10 ²	5-10	5-10	0,1	Sok vonal
CO ₂ -N ₂ - -He	10,6	10 ⁶ - 10 ⁹	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁹	1-10 ³	1-10 ²	1-25	2-10	10- 15	Sok vonal Nagy telj.
Rubin (Al ₂ O ₃ : Cr ³⁺)	0,694	10 ³ - 10 ⁹	10 ⁻³ - 10 ⁻¹²	0,01- 100	0,01- 0,1	5-10	1-10	0,1	Q - kapcs. módus szinkr.
Nd:üveg	1,06	10 ³ - 10 ⁹	10 ⁻³ - 10 ⁻¹²	0,01- 100	0,01- 0,1	5-25	1-10	1	u.a.
Nd: YAG	1,06	10 ³ - 10 ⁷	10 ⁻³ - 10 ⁻¹⁰	0,001- 1	10 ² - 10 ³	1-5	1-10	1	u.a., nagy ism. frekv.
festék	0,3-1	10 ³ - 10 ⁵	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁸	0,001- 1	1-10 ²	2-5	1-5	0,1- 50	Hangolha- tó, N ₂ lé- zer pump.
GaAs (félvez.)	0,65- 1,6	1-10	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁸	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁻³ - 10 ⁻²	100	30- 50	Kis méret Olcsó

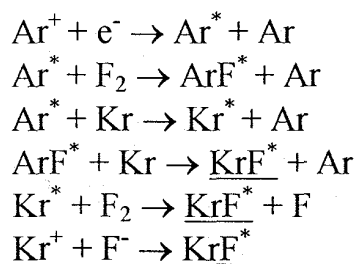
1 mrad \approx 0,06°

4) Különleges lézerek

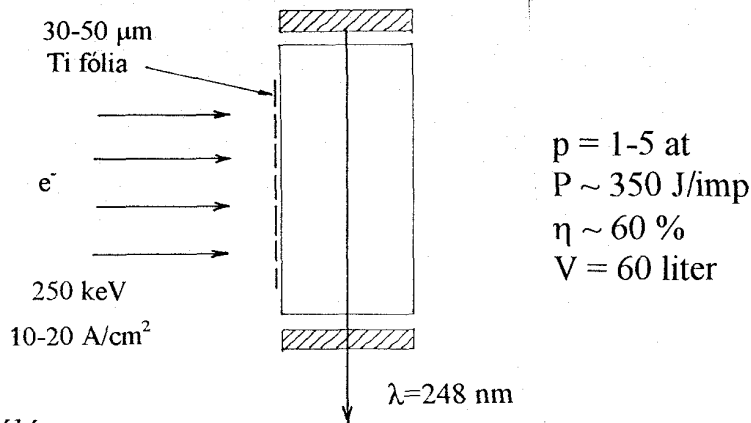
a) Excimer - exiplex lézerek

Ar:Kr:F₂ = 200:10:10 p ~ 3 at
ektrongerjesztés (200 - 300 keV) energiával

excited dimer
excited complex



} Ezek a nemesgáz vegyületek csak gerjesztett állapotban léteznek !



Pumpálás:

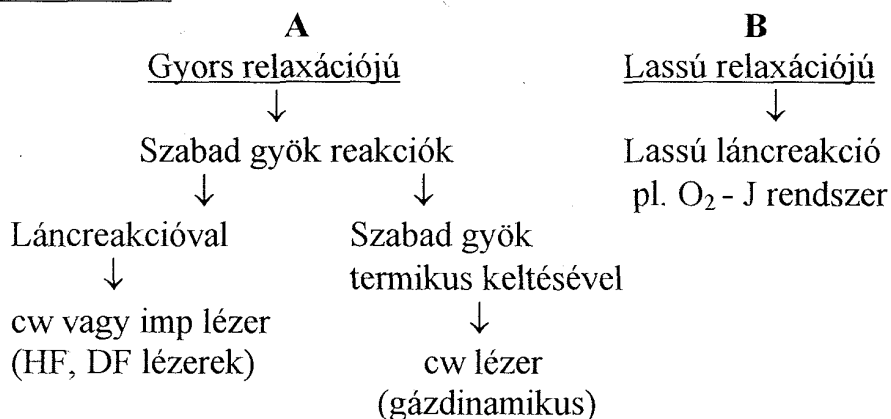
- elektronnyalábbal (Maxwell - generátor)
- UV besugárzás + keresztirányú nagyáramú impulzusok
- gázdinamikusan: kályha + szuperszonikus gázbefúvás

*Legfontosabb excimer lézerek
(a Lambda Physik cégtől)*

	ArF	KrCl	KrF	XeBr	XeCl	XeF
λ (nm)	193	222	248	282	308	351
P_{imp} (mJ)	125	60	225	17	90	90
$P_{csúcs}$ (MW) = P_i / τ	8	3,5	10	2	5	5
Imp.hossz. τ (ns)	14	15	18	7	15	15
ν_{ism} (Hz)	0,1-2	0,1-2	0,1-2	0,1-2	0,1-2	0,1-2
$P_{üzemi}$ (at)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

Gerjesztés: UV előionizáció + keresztirányú áramimpulzusok

b) Kémiai lézerek

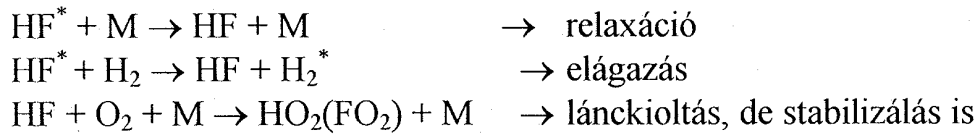
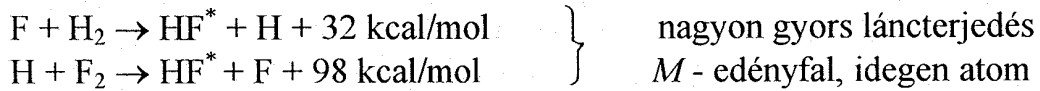


Példák:

A.1) Gyors relaxációjú, lánreakcióval terjedő rendszerek:

HF $\rightarrow \lambda = 2,6-3,3 \mu\text{m}$

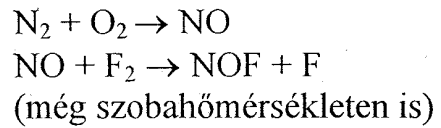
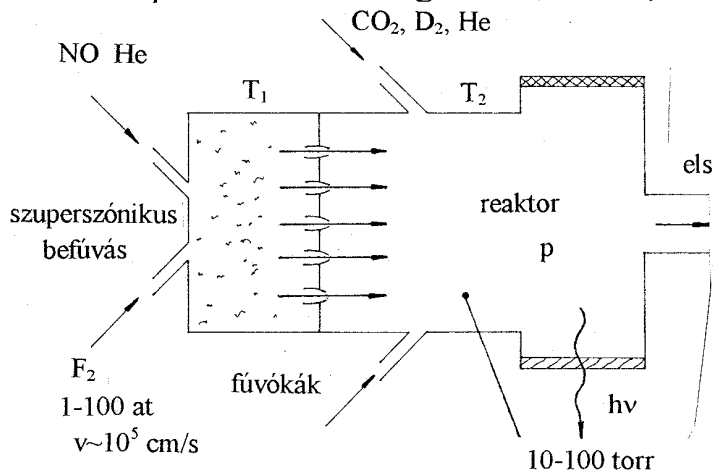
DF $\rightarrow \lambda = 3,7-4,1 \mu\text{m}$



A.2) DF - CO₂ (gázdinamikus rendszer)

NO:F₂:D₂:CO₂:He = 1: 6: 5 : 45 :100 torr parciális nyomással

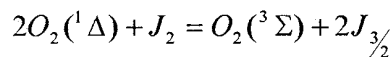
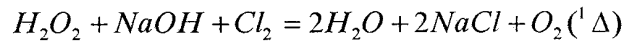
Alapelv: Hirtelen kitáguláskor lehűlés, és így populáció inverzió.



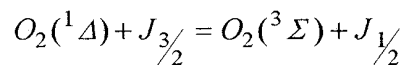
$T_1 \gg T_2, T_1 \approx 1400 \text{ }^\circ\text{C}$
 $P = 50-200 \text{ W/g}$
 $\eta_k = 4-5 \%$
 $\lambda = 9,4-10,6 \text{ } \mu\text{m}$

B) Az O₂ - J rendszer

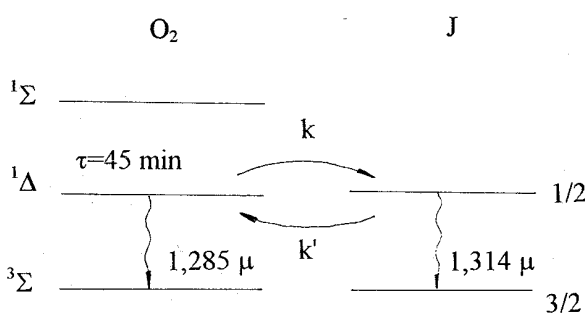
Előállítás:



→ disszociáció



→ gerjesztés



$$\frac{k'}{k} = e^{-\frac{h\nu}{k_B T}}$$

$J_2:Ar:O_2(^1\Delta) = 1 : 100 : 30 \text{ torr}$
 $E_{\text{spec}} = 60-300 \text{ W/g}$

cw üzemben $P \sim 1 \text{ kW}$
 (USA, 1980)

C) Gázdinamikus lézerek

Folytonos vagy imp. üzemben. $P_L = 20 \text{ kW} - 5 \text{ MW}$ fénytéljesítmény.

CO₂ lézer: benzin + levegő elégetésével ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$)

HF lézer: H₂ + F₂ reakciója ($\lambda \approx 2,5 \mu\text{m}$)

DF lézer: D₂ + F₂ reakciója ($\lambda = 4,5 - 5,5 \mu\text{m}$)

- egyelőre kis hatótávolság (1 - 10 km ?)

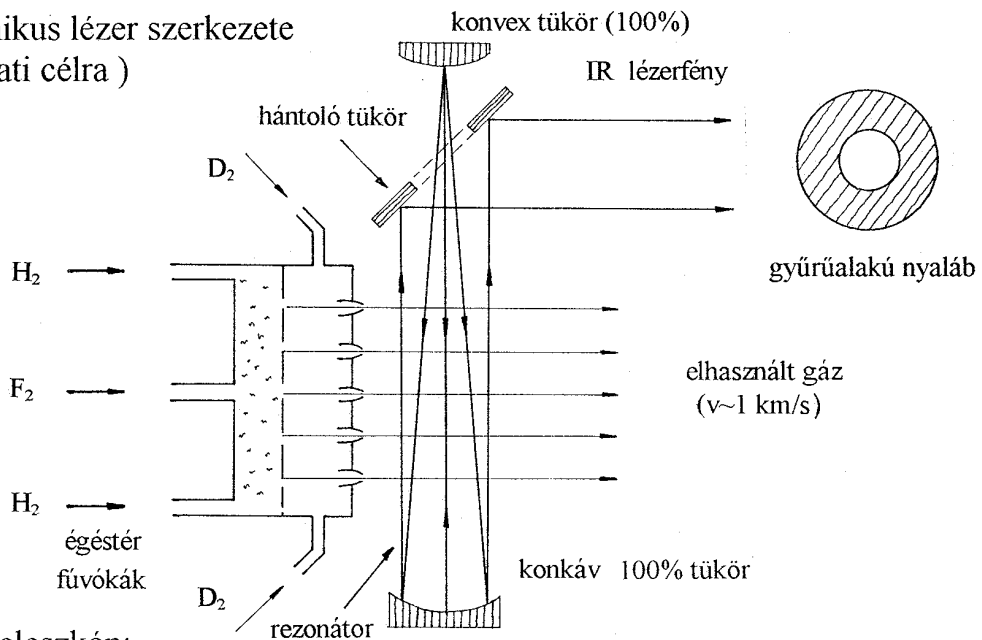
Romboló hatás: a felületen kialakuló plazma hő- és tolóhatása miatt lép fel.

Védekezés: tükröző felületekkel

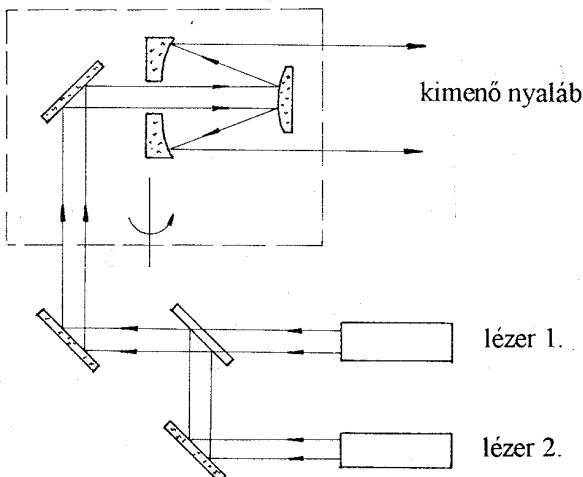
A víz abszorpciós vonala $\lambda \sim 2,7 \mu\text{m}$ -nál, ezért atmoszférában a CO₂ és DF használható csak.

A " csillagháború " (*star war*) egyik fegyvertípusa lett volna (az irányított sugarú proton- és más töltött részecske fegyverek mellett). A kutatások az USA -ban és a SZU -ban 1988 -ban leálltak (?).

A gázdinamikus lézer szerkezete
(pl. hadászati célra)



Fókuszáló teleszkóp:



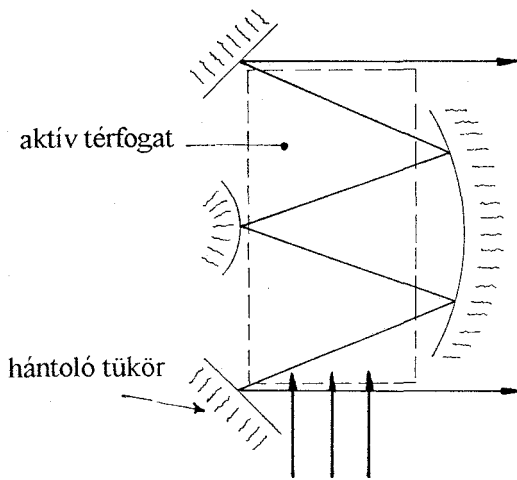
DF - CO₂ → 10±1 μm

HF* → 2,7±0,5 μm

DF* → 3,7-4,5 μm

$P \leq 5 \text{ MW}$ (kvázifolytonos)

A lézerágyú:



nyalábmetszet:
gyűrűalakú.
Előnye: a levegő
fényvezető kábelként
működik, elősegíti a
nyaláb fókuszálását.

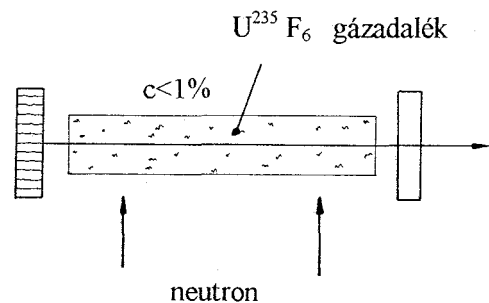
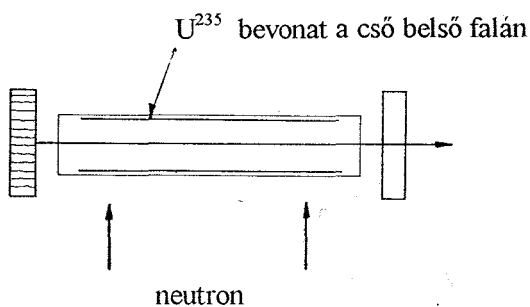
Fűvókák: elégetett kerozin+levegő keverékből $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Kísérlet: 800 kW Boeing 707 -re szerelve 300 -500 m -ről átégeti a 2 mm vastag dural lemezt (repülőgép, helikopter burkolata)

c) Nukleáris gerjesztésű lézerek

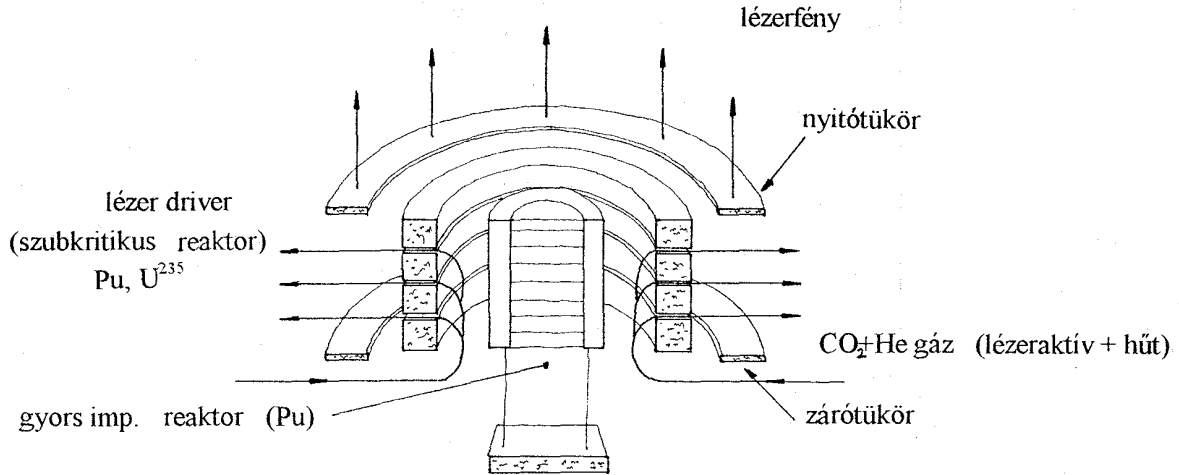
Alapelv: radioaktív hasadó anyagot (U^{235} , Pu) termikus neutronokkal bombázva maghasadás lép fel. Ezek a lézeraktív gázt ionizálják, termikusan és kinetikusán gerjesztik. Így lézerműködés lép fel, a gáztól függően akár az UV tartományban is.

Két alapvető megoldás van:



Úrbe telepíthető (star war) változatok:

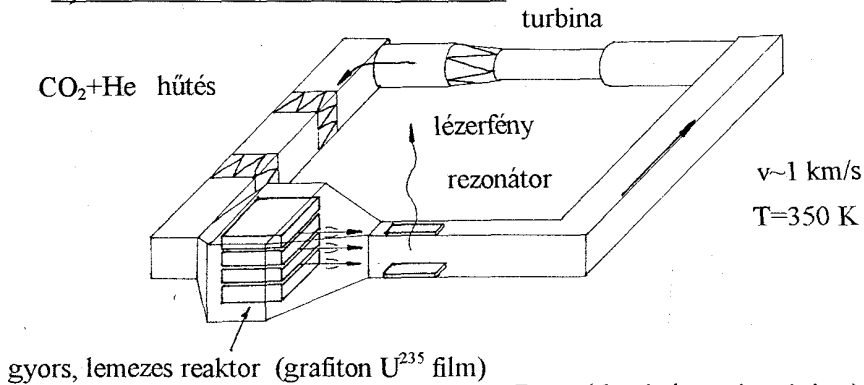
1) Szilárd fűtőanyagú reaktor - lézer



Ha pl. a mag $\varnothing 30 \times 30$ cm $U^{235} + Mo$ trigger reaktor, ez 100-200 μs alatt 6-14 MJ hőenergiát és $\phi \sim 10^{18} n/cm^2 s$ fluxust ad. $\varnothing 100$ cm, 150 magas köpeny ($V \sim 6 m^3$) ~ 21 MJ impulzusokat ad. Ennek 20 % -a (4 MJ) pumpálja a gázt. 50 % hatásfok esetén $P_{lézer} \sim 2$ MJ \rightarrow

$$\frac{2 \cdot 10^6 J}{10^{-4} s} \sim 2 \cdot 10^{10} W = 20 GW$$

2) Gázdinamikus reaktor - lézer



$$P_{lézer}(\text{kvázistacionárius}) \sim 60 MW$$

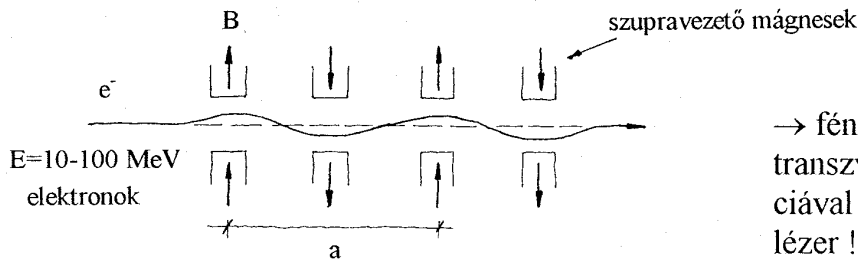
A reaktormag elhagyása után a gáz szuperszonikus fűvókákon halad át, ezáltal a gázdinamikus rendszereknek megfelelően a lézer üregben lehűlési populáció inverzió lép fel.

3) Gázfázisú reaktor - lézer

Kb. 6 kg $U^{235}F_6$ gázzal töltve, mely 700 K-en $\sim 3 m^3$ térfogatú. $c > 1$ % -nál viszont már mérgezi a lézélést, ezért koncentrációja limitált.

d) Szabad elektron lézer (FEL, *Free Electron Laser*)

Szinkrociklotron (e^- , e^+) tárológyűrűjén undulátor (modulátor).

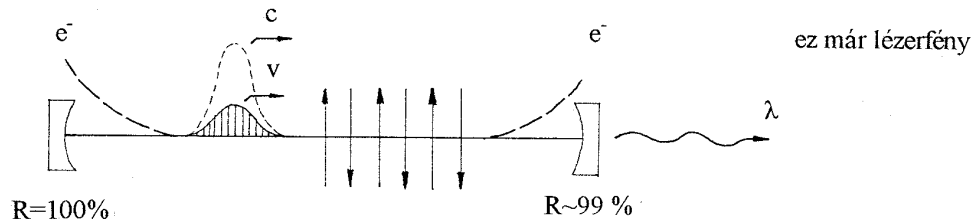


→ fényemisszió nagy transzverzális koherenciával (De ez még nem lézer !)

$$\lambda_n = \frac{a \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)}{2\gamma^2 n}$$

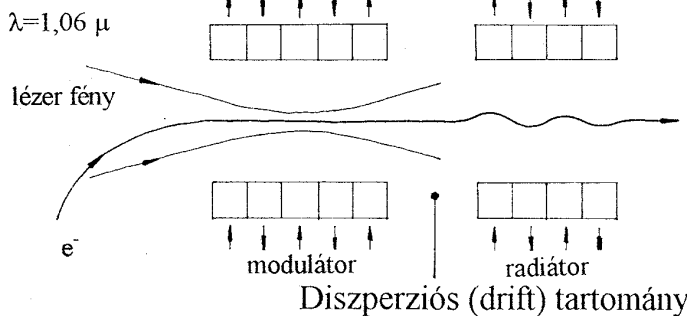
$K = 93,4 \cdot B \cdot a$; $\gamma = E/mc^2$; $n = 1, 2, 3 \dots$ felharmonikusok infravörösben, a - az undulátor periódusa és B - mágneses térerő.

FEL: 1977 *Madey* (Stanford, USA)



Orsay (Franciaország), 1983: $\lambda = 640-660$ nm (látható tartomány)

Optikai klisztron (1984-85) → az UV, VUV tartományban működik.

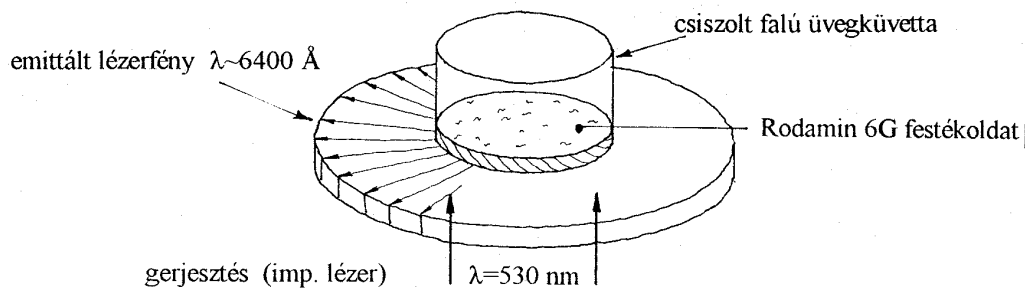


$\lambda \approx 355$ nm
E=166 MeV

→ $\lambda = 500 \text{ \AA}$ -ig működhet !

e) 2D és 3D lézerek

Bár az összes itt ismertett lézer vonalszerű (1D), ez nem feltétele a lézerműködésnek. Ha megfelelő geometriájú visszacsatolást tudunk létrehozni, a lézerefény síkban (2D) vagy térben (3D) is létrejöhet. Ilyen rendszert készített *Horváth Zoltán* (KFKI, 1979):



A küvetta üvegfalán visszaverődő fény a nagy lineáris erősítés miatt elegendő a visszacsatoláshoz.

3D változat: gömbalakú üvegeküvetta elhelyezett festékoldat.

f) Hangolható lézerek

1) Ar^+ , Kr^+ , CO_2 lézerek, melyek egyszerre több vonalon is működnek. A szükséges λ_0 kiválasztása rács vagy prizma diszperzív elemmel történhet.

2) Impulzus lézereknél frekvencia duplázás vagy négyszerezés nemlineáris kristály (ADP, KDP) alkalmazásával.

pl. Nd^+ lézernél $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ ha $I_0 = 1$
 $\lambda(2\omega) = 532 \text{ nm}$ $I(2\omega) \sim 0,1$ az intenzitás
 $\lambda(4\omega) = 266 \text{ nm}$ $I(4\omega) \sim 0,01$ az intenzitás

3) Festéklézer

4) Szincentrum lézer

77 K -en működő, Kr^+ , Ar^+ lézerekkel pumpált γ - besugárzott alkálihalid kristályok, ezekben F^+ , F^- , F^{2-} stb. szincentrumok nívói gerjeszthetők.

Kisugárzás: a $\lambda = 0,8\text{-}3 \mu\text{m}$ tartományban.

Az F^- - centrum: Cl^- , Br^- stb. ionvakancián befogott elektron .

III. A lézerek alkalmazása

- optikai kísérleteknél nagy fénysűrűségű, koherens fényforrás
- iránykitűzés, szintezés (pl. teodolitba épített He-Ne lézer)
- távolságmérés, sebességmérés (*lidar*)
- anyagmegmunkálás

100-1000W cw vagy 1-100 J/lövés , 100 μs időtartamú impulzusok a 0,5-1 mm vastag acéllemezt is átvágják.

Felhasználják fa, bőr, szövet, fém, kerámia, gyémánt, üveg vágására, fúrására, karcolására, gravírozására.

CO_2 , Nd:YAG és rubin lézerekkel

- Felhasználják fa, bőr, szövet, fém, kerámia, gyémánt, üveg vágására, fűrésására, karcolására, gravírozására.
 CO₂, Nd:YAG és rubin lézerekkel
- orvosi alkalmazások (sebgyógyítás, operálás)
 - sebgyógyítás:* 1-10 mW-os He-Ne vagy Nd:üveg "soft" lézerek, de gyakran polarizált lámpa is elegendő!
 - operálás:* általában CO₂ lézerrel (100-1000 W cw)
 - légszennyezettség mérése
 - 1-10 W Ar vagy Kr-lézerrel, a szennyezők azonosítása Raman-szinképek alapján
 - holográfia
 - kék- vagy egyéb lézerrel: rácskészítés, képalkotás
 - spektroszkópia
 - Raman-szórás, pikoszekundumos folyamatok, kinetikai vizsgálatok, stb.
 - izotópszétválasztás
 - pl. U²³⁵ dúsítása, amelyet a természetes 0,7 %-ról 3 %-ra dúsítanak reaktor fűtőelem előállításakor. Az eljárás 2 lépcsős: az első lépcsőben az U²³⁵ atomok lézeres, szelektív gerjesztése, majd ezt követően UV besugárzásos ionizáció és elektrosztatikus kivonás.
 - termonukleáris fúzió
 - Alapegyenlet:* $T_1^3 + D_1^2 = He_2^4 + n + 17,6 \text{ MeV}$
 - a fúzióhoz 10⁸ K hőmérséklet és legalább 1 s-ig tartó 10¹⁵ atom/cm³ sűrűség szükséges (mint a Napban).
 - Lézeres fúzió:* 10 kJ/10 ns lövések jelenleg, de 10 MJ/ 10 ns kellene a rentábilis kb. 5 %-nyi energia növekedéshez.
 - hadászati célokra (detektálás, megsemmisítés)
 - információ tárolás (pl. CD-ROM írás)
 - fénytávközlés
 - $\lambda=0,85, 1,3$ és $1,5 \mu\text{m}$ -es hullámhosszon működő félvezető lézerekkel ("transzmissziós ablakok"). Kvarc fényvezető kábel. Veszteség: 0,3-1 dB/km ezekben az ablakokban. Erősítők (repeaterek) bizonyos távolságokban. Európa-USA, Bécs-Budapest kábelek.