

TIMELINE

1917

Albert Einstein lansează fundamentele tehnologiei LASER când prezice fenomenul de “Emisie Stimulată”, fundamental în funcționarea tuturor laserilor.

1939

Valentin Fabrikant pune bazele teoretice ale utilizării emisiei stimulate pentru amplificarea radiației.

1950

Charles Townes (Columbia University-NY), Nikolay Basov și Alexander Prokhorov (P.N Lebedev Physical Institute-Moscow) dezvoltă teoria cuantică a emisiei stimulate și o demonstrează pentru microunde. În 1964 toți trei au primit Premiul Nobel în Fizică.

1957

Primul aranjament de tip laser a fost făcut de Charles Townes împreună cu cumnatul său Arthur L. Schawlow (fost doctorand la Columbia University). Eroarea lor a constat în faptul că au încercat pomparea laserului (inversia de populație) folosind becuri electrice obișnuite. Este cooptat și Gordon Gould, care schițează un prototip de laser în agenda sa.

1958

Townes și Schawlow descriu conceptul lor de laser și-l publică în Physical Review în luna decembrie. Urmează realizarea practică a conceptului și punerea lui în funcțiune.

1959

- Columbia University graduate student Gordon Gould, student licențiat al Universității Columbia, propune într-o prezentare la o conferință ca emisia stimulată să fie aplicată la amplificarea luminii. Descrie un rezonator optic ce poate crea un fascicol îngust de lumină coerentă și pe care îl denumește LASER de la “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. Dorind patentul pentru invenția sa, părăsește Columbia Univ. înainte de a-și termina doctoratul și se mută la o firmă de cercetare privată TRG (Technical Research Group). A obținut fonduri de la ARPA...
- Townes și Schawlow aplică pentru brevet. Independent de ei și Gould face același lucru.

1960

- Se acordă brevetul de invenție lui Townes și Schawlow pe 22 martie.
- Theodore Maiman construiește primul prototip funcțional al unui laser la Hughes Research Laboratories în Malibu, California, pe 16 mai. Acest laser folosește un mic cristal mineral cilindric de rubin ca mediu activ și emite un fascicol de lumină roșie cu lungimea de undă de 694.3 nm.

- Se construiește în decembrie, de către Ali Javan, William Bennett, Jr. și Donald Herriott de la Bell Labs, primul laser în regim continuu cu amestec de He și Ne (90 – 10), cu $\lambda = 632.8$ nm.

1962

Robert N. Hall de la General Electric Research and Development Center în Schenectady-NY, construiește primul laser cu semiconductor.

1963

Laserul cu bioxid de carbon (CO_2) este dezvoltat de Kumar Patel la AT&T Bell Labs. Prezintă un amestec de gaze din CO_2 , N_2 , He și vapori de apă. Are $\lambda = 9.6 - 10.6$ μm .

Laserul cu CO_2 este mult mai ieftin și mult mai eficient decât laserul cu rubin. Acesta a devenit cel mai popular laser industrial în următorii 50 de ani.

Generalități

Laserii se pot clasifica după modul de funcționare (regim continuu sau pulsant), după mediul activ utilizat (solid, lichid, gaz sau semiconductor), după domeniul spectral în care emit (ultraviolet, vizibil sau infraroșu) și după natura electronilor implicați în obținerea radiației laser (cu electroni legați sau cu electroni liberi).

- Cele mai utilizate procese sunt cele cu electroni legați în care pentru producerea radiației laser sunt utilizate atât tranzițiile electronilor de pe nivelele exterioare atomice, ionice și moleculare cât și cele de pe nivelele inferioare atomice (emisii stimulate în domeniul razelor X).

Sunt caracterizați în principal de energie, frecvență și lungime de undă:

1. $E_2 - E_1 = h\nu$ $[j] = [j*s] * [1/s]$
2. $\lambda = c/\nu$ $[m] = [m/s] / [1/s]$
3. $E_2 - E_1 = h*c/\lambda$

Există cinci principii ce stau la baza înțelegerii laserilor:

1. Absorbția

- conform mecanicii cuantice, absorbția fotonilor de către atomi are loc doar dacă lungimea de undă λ a fotonului are valoarea necesară. Dacă se întâmplă asta, atomul va absorbi fotonul și va trece pe o stare energetică mai înaltă.

2. Emisia spontană

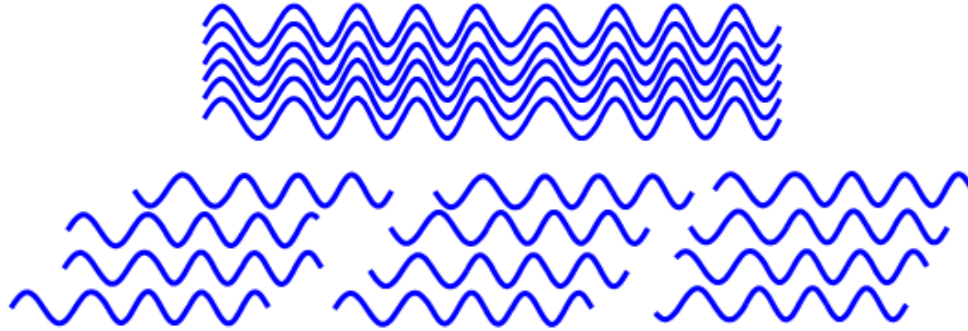
- eliberarea unui foton datorită acțiunii electronilor ce-și schimbă stările energetice. În stare excitată un atom stă ~10 ns și emite de la sine un foton când trece pe starea fundamentală sau pe un nivel energetic intermediar.

3. Emisia stimulată

- apare în timpul cât un electron excitat se află într-o stare energetică mai înaltă. Un foton cu energia egală cu diferența dintre nivelul prezent al electronului și un nivel energetic

mai scăzut poate cauza (sau stimula) emisia unui al doilea foton egal ca energie și frecvență cu cel inițial, prin dezexcitarea electronului respectiv pe starea fundamentală sau pe o stare energetică intermediară.

- dacă există nivele energetice intermediare cu durata de viață ~ 1 ms, acestea se numesc nivele metastabile și tranziția pe acestea se face non-radiativ. Stările metastabile sunt stări cumulative, adică pot înmagazina mulți atomi în aceeași stare. Aceasta este esența maserului și a laserului! Toți fotonii sunt sincronizați într-un anumit fel, anume prin **monocromatism** (aceeași lungime de undă) și prin **coerență** (aceeași fază și direcție). Emisia stimulată susținută nu este garantată pentru niciun nivel energetic așa că mai este necesar și un număr critic de electroni ce emit fotoni. **Emisia stimulată** are loc doar de pe **nivele metastabile**.



4. Inversia de populație

- populația se referă la numărul de electroni, iar inversia se referă la modificarea stării unui electron pe un nivel energetic mai înalt. Pentru a susține emisia stimulată în mod eficient este necesar să avem mulți electroni pe stări energetice înalte, mai mulți de jumătate dintre cei aflați în starea fundamentală. Cu cât este mai mare nivelul energetic al electronilor cu atât este mai înalt gradul de inversie al populației, deci crește șansa de emisie amplificată, dar și energia de excitație necesară este mai mare. Energia necesară inversiei de populație nu poate veni decât din exterior de la o sursă de lumină (flash), alt laser sau o descărcare electrică. Folosirea unei surse de lumină se mai numește **pompaj optic**. **Inversia de populație** se referă la creșterea numărului de electroni într-o **stare metastabilă**.

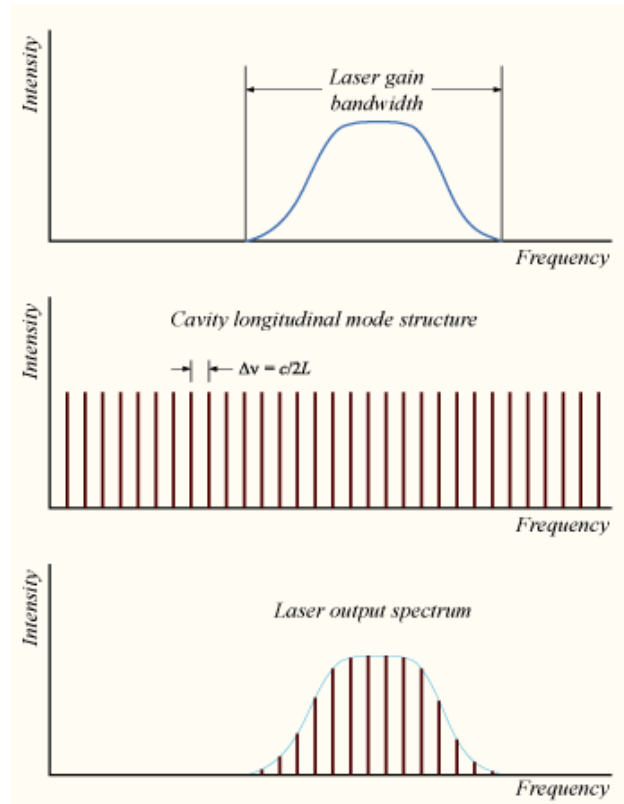
5. Amplificarea

- este rezultatul inversiei de populație și emisiei stimulate. Când o inversie de populație este prezentă, rata de emisie stimulată depășește absorbția. Aceasta se întâmplă deoarece sunt mai mulți electroni într-o stare energetică excitată pentru care doi fotoni sunt generați de către un singur foton incident.

Când Maiman a obținut prima dată efectul laser pe 16 mai 1960, s-a spus că s-a găsit o “soluție în căutarea problemei”. La vremea respectivă nu s-a înțeles bine cum stau lucrurile și ce înseamnă pentru viitor. Imediat a trimis spre publicare un articol la “Phys. Rev. Lett.”, dar a fost respins de către editor! Motivul: prea multe articole referitoare la maseri fuseseră primite (în iunie 1960 Maiman publicase deja în revistă un articol referitor la excitarea rubinului cu lumină) și revista nu mai primea articole pe tema asta. Revista “Nature” a publicat însă imediat articolul, pe data de 6 august 1960.

Cu toate ca laserul reprezintă cea mai pură formă de lumină, el nu este monofrecvență. Toți laserii produc lumină într-o lățime de bandă proprie, adică într-un spectru de frecvențe caracteristic. De exemplu:

1. Un laser Ti:safir are o lățime de bandă de amplificare de ~ 128 THz ($\lambda = 300$ nm centrată la 800 nm).
2. Un laser He-Ne are o lățime de bandă de amplificare de ~ 1.5 GHz ($\lambda = 0.002$ nm centrată la 633 nm).



Un laser nu este altceva decât o cavitate de tip Fabry-Perot, adică două oglinzi plasate la capătul unui mediu activ laser. Întrucât lumina este undă, când se reflectă între oglinzile cavității, ea va interfera constructiv și destructiv cu ea însăși, conducând la formarea unor unde staționare (sau moduri) între oglinzi. Aceste unde staționare formează un set discret de frecvențe, denumite moduri longitudinale ale cavității. Aceste moduri sunt singurele frecvențe auto-regenerabile și lăsate să oscileze de către cavitatea rezonantă. Toate celelalte frecvențe ale luminii sunt anulate de către interferențele destructive.

Pentru o cavitate cu oglinzi plane, modurile permise sunt acelea pentru care distanța L dintre oglinzi este un multiplu exact de jumătăți de lungime de undă λ astfel încât:

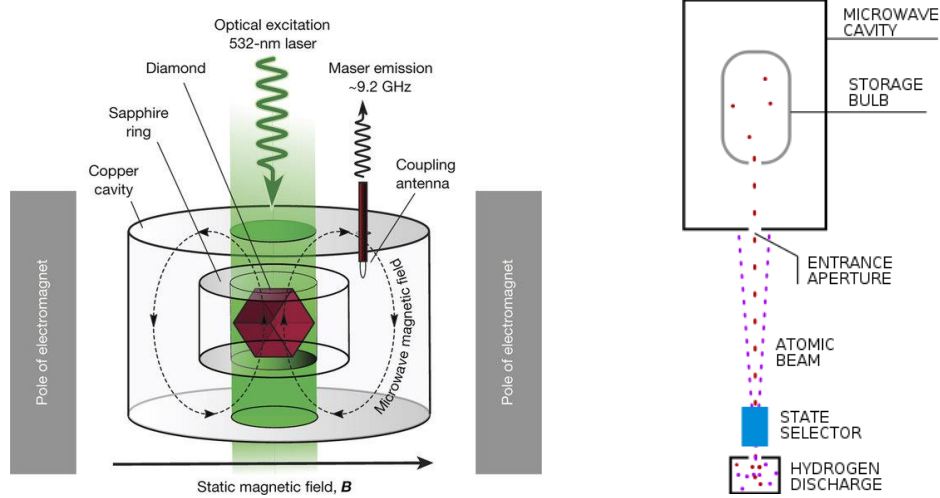
$$L = k \cdot \lambda/2 \quad k = \text{constantă denumită ordinul modului}$$

$$L \gg \lambda \quad k \sim 10^5 - 10^6$$

De mare interes este frecvența de separare dintre oricare două moduri adiacente q și $q + 1$.

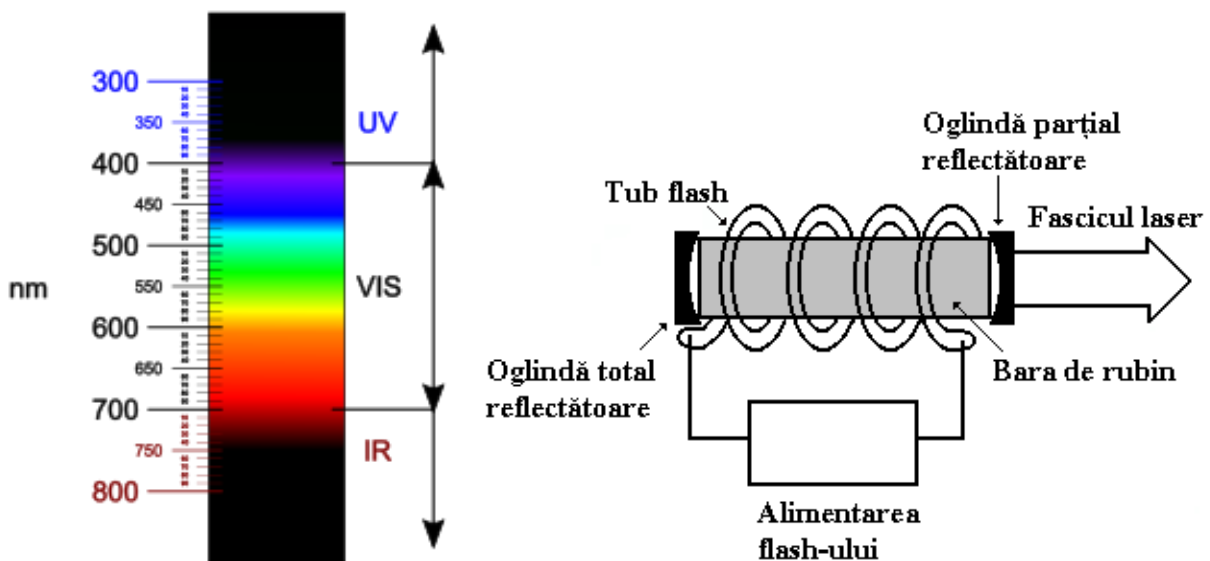
$$\Delta\nu = c/2L \quad c = \text{viteza luminii în vid } (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})$$

Maser

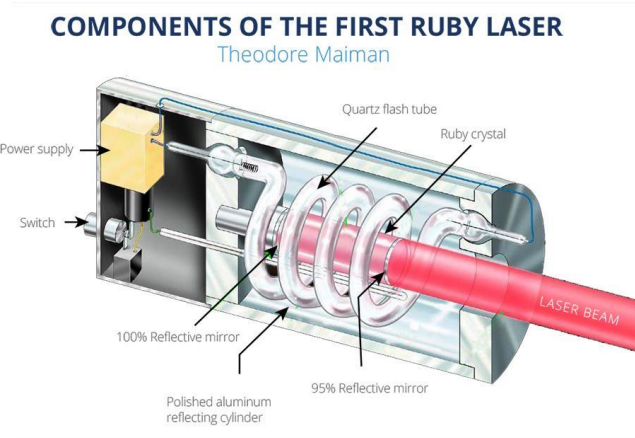


- Fascicolul de atomi de H este produs prin descărcare electrică.
- Selectorul de stare crează inversia de populație a atomilor de H, într-un mod asemănător cu experimentul Stern-Gerlach, care a demonstrat că orientarea spațială a impulsului unghiular este cuantificată. După trecerea printr-un colimator și un câmp magnetic mulți atomi rămân excitați. Dezexcitându-se, emit microunde.
- Cavitatea de microunde cu factor Q ridicat confinează microundele și le reinjectează în mod repetat în fascicolul de atomi. Emisia stimulată amplifică microundele la fiecare trecere prin fascicol. Frecvența de rezonanță a cavității de microunde este reglată la frecvența de tranziție energetică hiperfină a hidrogenului, adică la 1 420 405 752 Hz, ce înseamnă o precizie de 1 s la 31.71 milioane de ani.

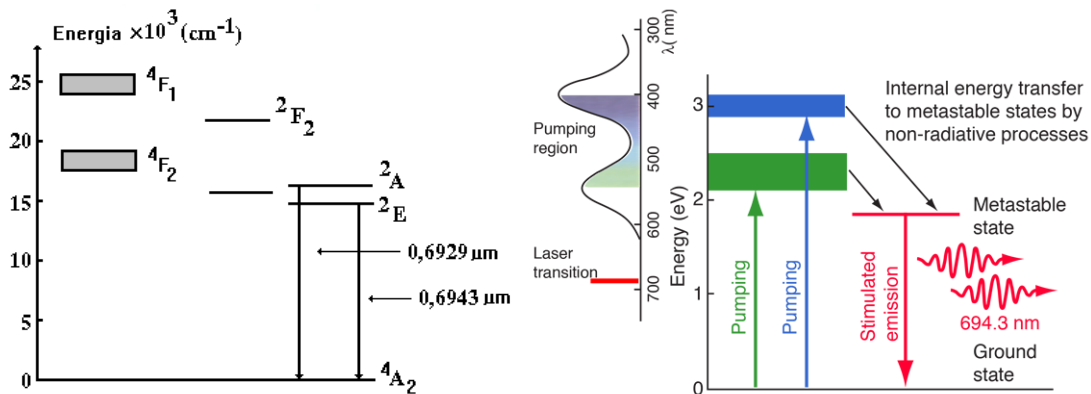
Laser



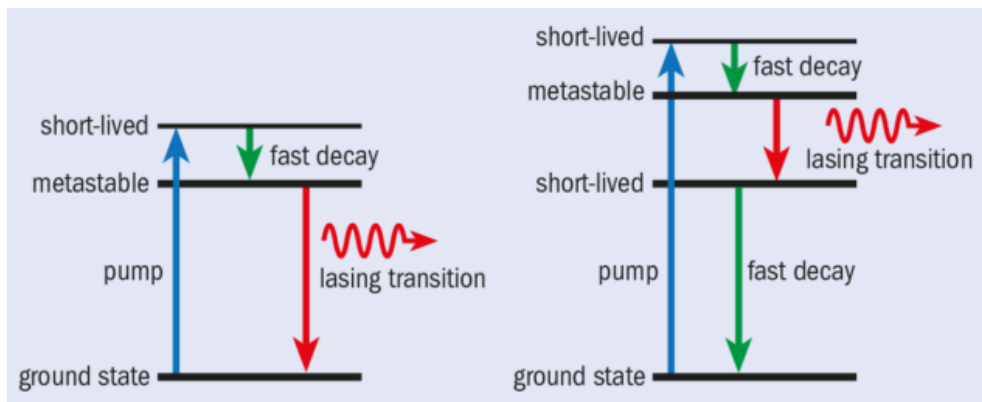
Laserul cu rubin



Mediul activ utilizat la fabricarea laserului cu rubin este rubinul mineral - cristalul de oxid de aluminiu (Al_2O_3 ce conține 0,05% Cr_2O_3) dopat cu ionii de Cr^{3+} , care reprezintă elementele active în emisia radiației laser. Diagrama nivelelor energetice ale unui laser cu rubin este prezentată mai jos:



Tranzițiile laser cele mai importante având $\lambda_1 = 6943 \text{ \AA}$ și $\lambda_2 = 6929 \text{ \AA}$ au loc între nivelele $2E \rightarrow 4A_2$ și respectiv $2A \rightarrow 4A_2$. Benzile largi $4F_1$ și $4F_2$ pot fi populate eficient prin pompaj optic cu ajutorul unei lămpi cu descărcare în xenon (flash). Ionii astfel excitați se dezexcită în 10^{-7} s prin procese neradiative cu emisie de fononi trecând pe stările metastabile $2E$ și $2A$ ($5 \cdot 10^{-3}$ s) de unde revin pe nivelul fundamental emițând radiația laser, sistemul laser fiind cu **trei nivele**.



Rubin (3 nivele)

YAG (4 nivele)

Bara de rubin are diametrul de aproximativ 1 cm și lungimea de câțiva centimetri. Una din oglinzile cavității este total reflectorizantă, iar cealaltă este parțial transparentă și permite cuplajul radiației laser cu exteriorul.

Oglinzile se obțin fie prin depuneri de straturi subțiri de argint sau dielectrice cu indici de refracție alternanți ca valoare. Ionii de Cr^{3+} sunt excitați de lampa flash, durata de iluminare fiind de câteva ms, iar energia consumată de $\sim 10^4$ J. Funcționarea laserului cu rubin poate avea loc în două moduri, fie în impulsuri (mode-locking sau Q-switched) sau în regim continuu. Modurile “mode-locking” și “Q-switched” pot fi active sau pasive. În regim de impulsuri s-au obținut puteri de 10^8 W \div 10^9 W pentru o durată a pulsului de 10^{-8} \div 10^{-9} s.

1. Mode-locking activ

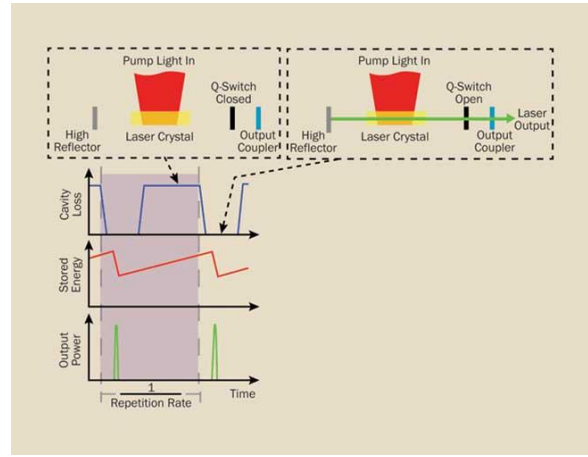
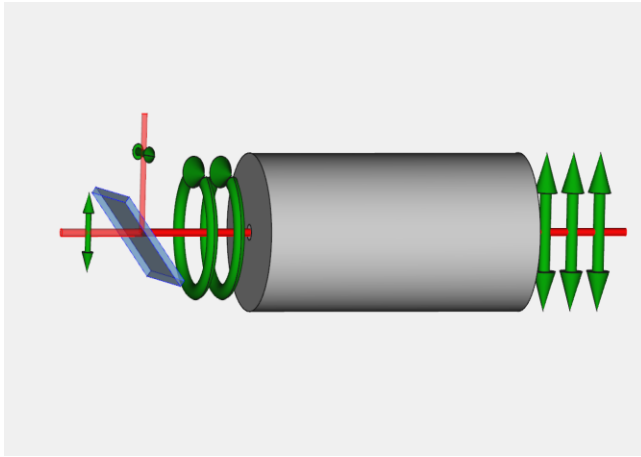
- a. Se plasează un modulator electro-optic în cavitatea laser. Pus sub tensiune, acesta produce o modulație de amplitudine sinusoidală a luminii din cavitate.

2. Mode-locking pasiv

- a. Se face cu ajutorul unui absorbant saturabil. Acesta este un dispozitiv optic ce manifestă o transmisie dependentă de intensitate.

3. Modul Q-switching mai este cunoscut și ca modalitatea de formare a pulsurilor gigant. În comparație cu mode-locking duce la o repetiție a pulsurilor mult mai mică însă energii ale pulsurilor mult mai mari și o durată a pulsurilor mult mai lungă. Uneori mode-locking și Q-switching se folosesc împreună! Se obține prin plasarea unui atenuator variabil în cavitatea rezonantă. Când atenuatorul funcționează lumina care părăsește mediul de amplificare nu se mai întoarce și efectul laser nu se produce. Această atenuare în interiorul cavității rezonante corespunde unei scăderi a factorului Q (factor de calitate) al rezonatorului optic. Un factor Q ridicat corespunde unor pierderi mici în rezonator per trecere. Permite saturarea amplificării la un anumit nivel maxim după care urmează declanșarea pulsului prin comutarea rapidă de la un Q scăzut la unul ridicat.

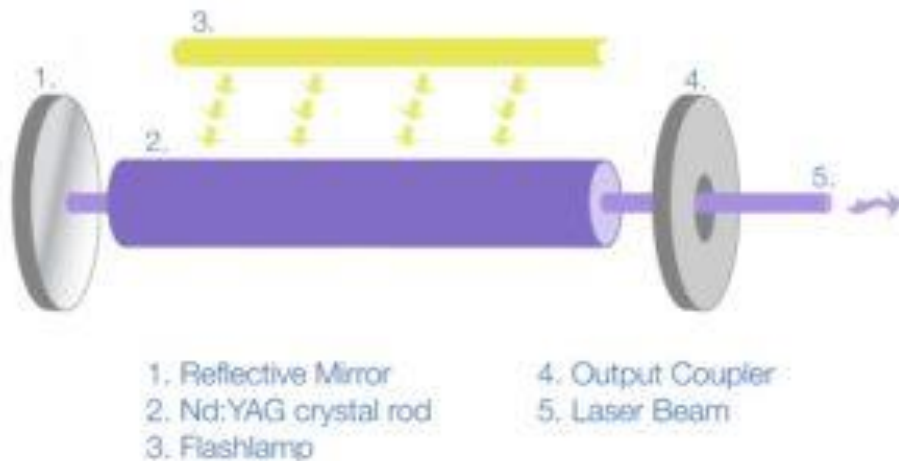
- a. Q-switching activ, când atenuatorul variabil este controlat din exterior. Poate fi mecanic (declanșator, disc-chopper, oglindă/prismă rotitoare) sau electric (modulator acusto-optic, magneto-optic sau electro-optic) – o celulă Pockels sau Kerr.
 - i. Efect Pockels – efect electro-optic linear, schimbă sau produce **birefrința** (indicele de refracție) într-un mediu optic în funcție de un câmp electric aplicat și este proporțională cu valoarea acestuia. O celulă Pockels acționează ca o placă sfert de undă, convertind polarizarea luminii din liniară în circulară și invers.
 - ii. Efectul Kerr – schimbarea birefrinței este proporțională cu pătratul câmpului.
- b. Q-switching pasiv, când avem un absorbant saturabil, adică un material a cărui transmisie crește când intensitatea luminoasă depășește un anumit prag. Poate fi un cristal YAG dopat cu ioni (Cr:YAG pentru laserii Nd:YAG), o vopsea opacă ce devine transparentă sau un semiconductor pasiv.



Celula Pockels

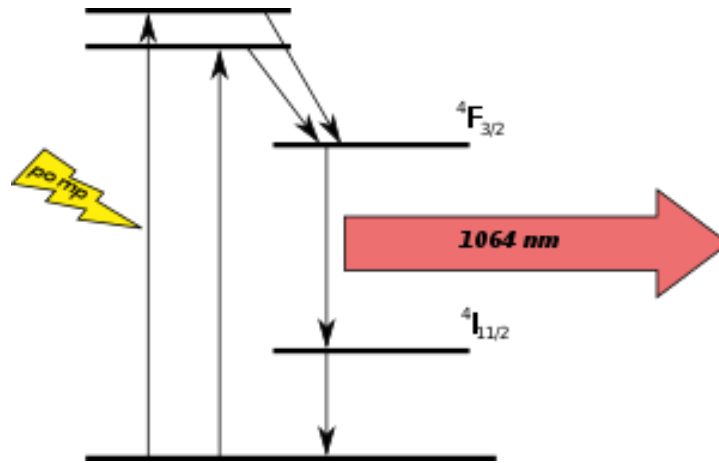
Laserul cu YAG

Basic Elements of a Laser

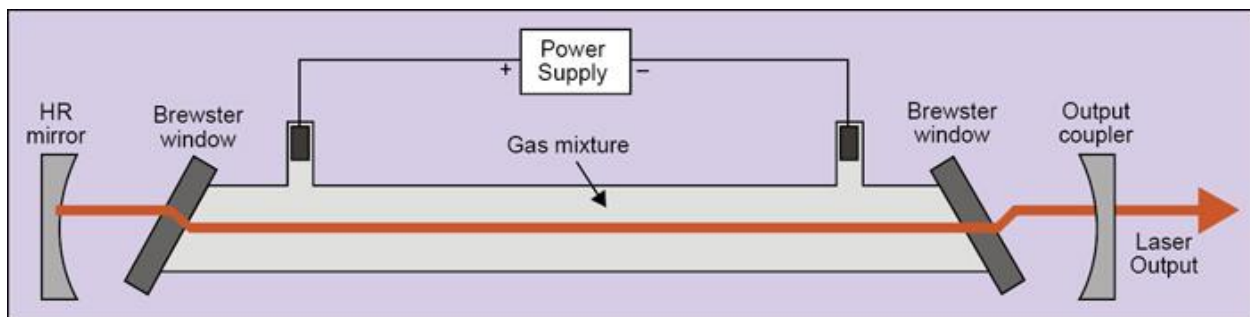


Denumirea de YAG vine de la compusul ytriu - aluminiu - granat ($Y_3Al_5O_{12}$) și este un material sintetic cristalin. YAG-ul, ca și rubinul și safirul, nu se pot folosi ca medii laser când sunt pure. Dopate însă cu ionul adecvat devin medii active. Pământuri rare precum erbiul și neodimul pot fi dopate în YAG ca ioni laser activi, rezultând Er:YAG și Nd:YAG. Mai mulți ioni diferiți dopați împreună în YAG dau denumirea cristalului rezultat, ex. Nd:Ce:YAG. Cel mai popular este laserul Nd:YAG, inventat în 1960 și devenit perfect operațional în 1964.

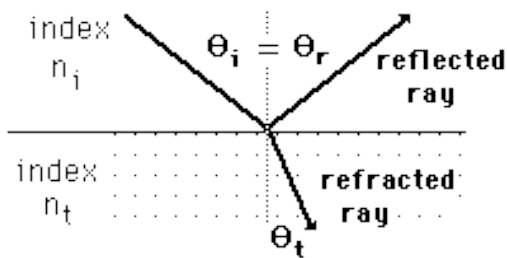
1. Cea mai bună bandă de absorbție este centrată la 807.5 nm cu lățimea de 1 nm.
2. Produce lumină infraroșie cu $\lambda = 1064$ nm.
3. Asociat cu cristale ce dublează sau triplează frecvența, pot emite în verde (532 nm) sau în ultraviolet (355 nm).
4. În mod Q-switched atinge puteri de 250 MW cu durata de 10 – 25 ns.
5. Laserul cu YAG este un sistem cu **patru nivele**.



Laseri cu gaz



- unghi Brewster = unghiul de incidență la care lumina cu o anumită polarizare este perfect transmisă printr-un dielectric transparent, fără reflexie.



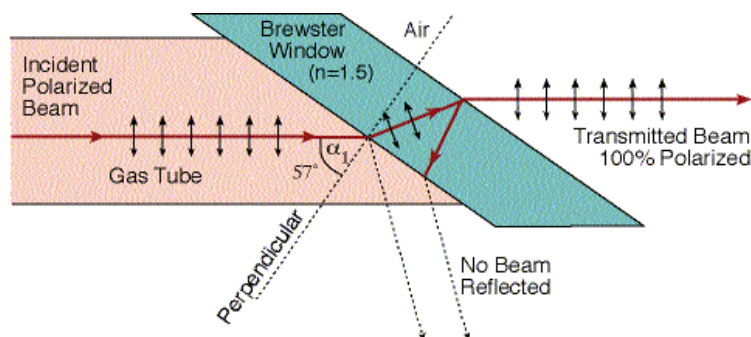
$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} = 0$$

when $\theta_i + \theta_t = 90^\circ$.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin(90^\circ - \theta_i) \quad \text{by Snell's law}$$

$$\tan \theta_i = \frac{n_t}{n_i}$$

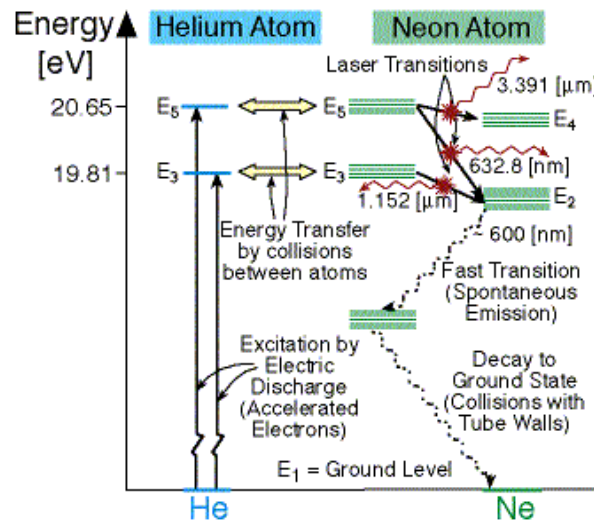
Dacă $\theta_i = \theta_B \rightarrow \theta_B = \arctan(n_t/n_i)$



Emisia laser **polarizată** este importantă într-un domeniu larg de aplicații:

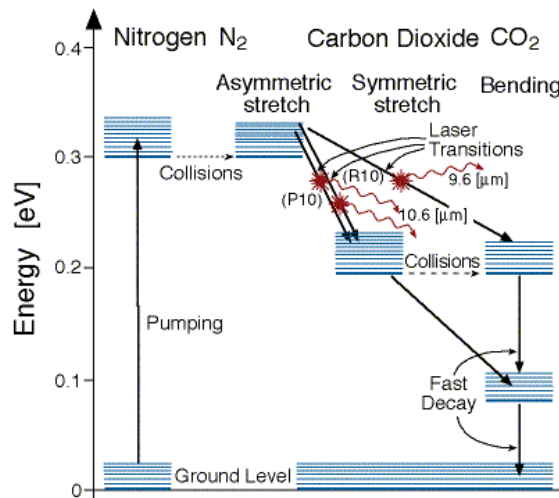
- conversia frecvenței neliniare, unde potrivirea fazei într-un cristal neliniar se obține doar pentru o direcție polarizată.
 - cazurile în care două fascicule laser trebuie cuplate – combinarea fasciculelor polarizate
 - procesarea fasciculelor laser în dispozitive dependente de polarizare, de exemplu interferometre, amplificatoare optice cu semiconductori, modulate optice, etc.
 - la tăierea materialelor, viteza de tăiere este mai mare în direcția polarizării.
- Gradul de polarizare liniară este de obicei cuantificat cu raportul extincție/polarizare (PER), definit ca raportul puterilor optice în două direcții de polarizare și se măsoară în decibeli. Experimental, se măsoară puterea transmisiei pe direcțiile respective. Polarizarea poate fi perturbată de birefrința dependentă de temperatură.

Laserul He-Ne

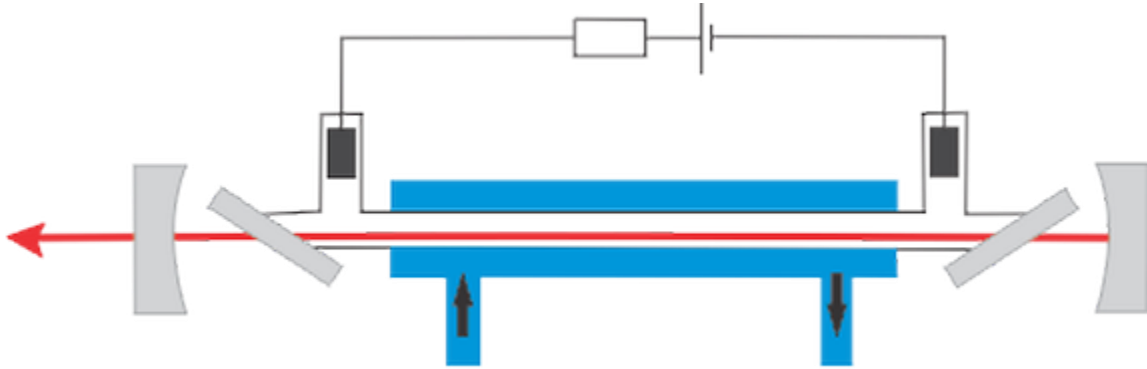


- He-Ne (90-10)
- sunt medii active închise

Laserul cu CO₂



- 10-20% CO₂
- 10-20% N₂
- ~%H₂ și/sau Xe și/sau H₂O – în funcție de tehnologia mediului activ
- în rest He



- pot fi cu medii active închise sau cu circulație de gaz. Tubul laser este răcit cu apă!
- este pompat prin descărcare în gaz, ce poate fi operat în DC, în AC (20 – 50 Hz) sau în RF.
- moleculele de azot sunt excitate prin descărcare pe un nivel vibrațional metastabil și își transferă energia de excitație moleculelor de CO₂ când se ciocnesc cu acestea. He servește atât la depopularea nivelelor laser inferioare cât și la îndepărtarea căldurii acumulate. Hidrogenul și/sau vaporii de apă ajută, mai ales în cazul tuburilor laser închise, la reoxidarea monoxidului de carbon.

Bătălia brevetelor

- 1958 – Schawlow și Townes au aplicat pentru brevetul laserului.
- 1959 – Gould a aplicat și el pentru brevet laser. A introdus public, într-o prezentare la o conferință, denumirea de LASER. A părăsit Universitatea Columbia înainte să-și finalizeze doctoratul și s-a angajat la firma Technical Research Group. Gordon Gould și TRG au început să aplice (pe baza caietului de laborator din 1957) pentru brevete la tehnologiile dezvoltate pe baza rezonatorilor optici de tip F-P și aplicații.
- 1967 – Gould a părăsit TRG pentru Institutul Politehnic din Brooklin.
- 1968 – primul patent laser referitor la generarea razelor X folosind laserii.
- 1970 – TRG a fost cumpărat de către Control Data Corporation, de la care Gould a putut să-și răscumpere drepturile de autor pentru 1000 \$ plus o cotă parte din profiturile ulterioare.
- 1973 – Gould a părăsit IP-Brooklin și a devenit acționar la înființarea Optelecom – firmă de comunicații prin fibre optice.
 - o 1977 – brevet pentru “Amplificator Optic”, ce includea și amplificatorii laser pompați optic.
 - o 1979 – brevet pentru tehnologii cu laseri, incluzând încălzirea și evaporarea mineralelor, suduri, tăieri și găuriri, măsurarea distanțelor, sisteme de comunicații și televiziune, copiatoare laser și fuziunea laser.
 - o 1979 – a înființat firma Patlex (evidența brevetelor, licențe și executări silite)
- 1985 – Tribunalul Federal din Washington a hotărât ca Biroul de Patente să-i acorde lui Gould brevet pentru “Amplificatori laser pompați prin ciocniri”. Apoi brevet pentru

“Ferestre la unghi Brewster”. Ca să nu împartă drepturile de autor cu Optelecom, în prealabil a părăsit firma.

- 1987 – Patlex a executat silit firma Control Laser și a cumpărat-o.
- În total Gould a primit 48 de patente.
- A cedat 80% din procedeele inventate ca să-și poată finanța procesele.
- 1991 – a fost inclus în Hall of Fame

Este cea mai celebră luptă a brevetelor din istorie, cunoscută ca “Războiul Patentelor de 30 de ani”.