

LASERRA: ARGI BERRI BATEN 25. URTEURRENA

JAZINTO ITURBE (*)

1960.ean, T.H. Maiman-ek lehendabiziko laserra eraiki eta funtziona erazi egin zuen. Orduetik hona, ia ez dago Zientziaren arloan ezer argi berezi honek argitu ez duenik. Eta eguneroko bizitzan ere nabaritzen hasi gara argi honen eragina.

Artikulu honetan, laserraren oinarriaz —laburki, zeren jadanik tratatu izan bait da aldizkari honetan (1)— eta laser-mota desberdinez ari-tuko naiz; beraren ezaugarriez eta erabilieraz bigarren batean, eta az-ken batean, beraren aplikazioez Ki-mikaren alorrean.

1.- SARRERA

Laser hitza, akronimo bat da, ingelesezko honetatik datorrena, *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, hots, **Erra-diazioaren Emisioa Estimulatuz lorturiko Argiaren Anplifikazioa**.

Honen oinarri teorikoa, *Einsteinek* 1917.ean finkatutakotik atera dai-teke, hots, sistema baten absortzio-eta emisio-koefizienteen kontzeptue-tatik. Honen arabera, bi maila ener-getiko dituen sistema batean, erra-diazioarekiko posible dira hiru pro-zesu: absortzioa — B_{12} koefizientez deskribatua —, emisio espontaneo — A_{21} koefizientez deskribatua — eta emisio estimulatua — B_{21} koefi-zientez deskribatua — (ikus I. irudia). Orduan, maila ezitatuari dagoen sistema, funtsezko egoerara itzultze-ko bi bide ditu, erradiazioa igorritz, espontaneoa bata, eta mailen arteko energia-diferentziari dagokion fre-

(*) Kimika Fisikoko Departamentua. Zientzi Fakultatea. Euskal Herriko Unibertsitatea. P.K. 644. Bilbo.

kuentziako erradiazioak eragindako estimulatua, bestea.

Bi fenomenook elkarrekin konpetentzian daude, eta bien arteko erlazioa hauxe da (2):

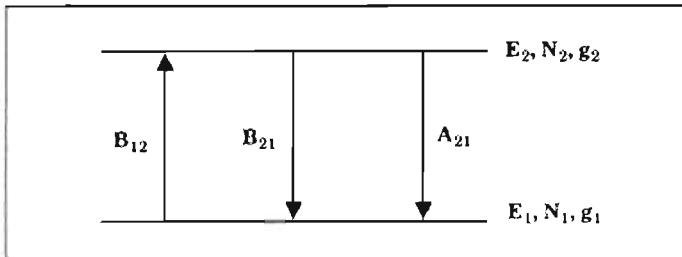
$$\frac{A_{21}}{B_{21}\rho(\nu)} = e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \quad |1|$$

non $\rho(\nu)$, ν frekuentziako erradiazioaren dentsitatea baita; h , Planck-en konstantea; k , Boltzmann-en konstantea; eta T , sistemaren temperatura absolutua.

Sistema arrunt batean, bi emisioak elkarrekin konpetentzian egongo dira, eta emisio estimulatua behargarri izateko, behintzat bata bestearen pareko izan behar dira, hots, $A_{21} \approx B_{21} \rho(\nu)$. Hori gertatzen denean,

$$\frac{h\nu}{kT} = \ln 2 \quad |2|$$

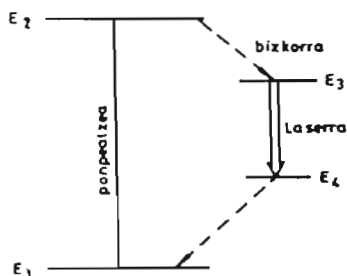
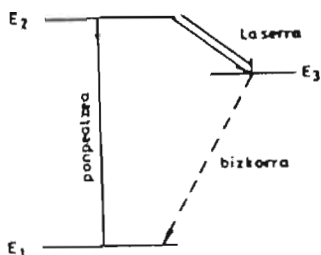
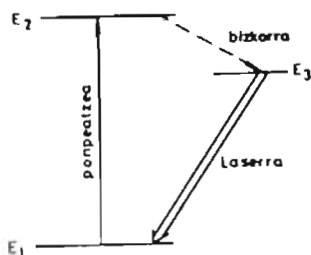
eta argi-iturriaren temperaturaren ordena 10^3 K bada, erradiazio estimulatukoaren frekuentzia, gutxi gorabehera, $1,44 \cdot 10^{13}$ Hz izango da, zeina 21 μm -tako (21000 nm) uhin-luzerako erradiazio elektromagnetikoari, argiari alegia, bait dagokio.



1. irudia: Bi mailetako sistema baten Einstein-en koefizienteak. Kontutan hartu, absortzio eta emisio estimulatutuek, eremu elektromagnetikoaren dentsitatez, $\rho(\nu)$, dependitzen dutela, emisio espontaneoak, aldiz, ez du dependitzen. E_1 eta E_2 sistemaren energi mailak; N_1 eta N_2 , populazioak, hots, maila bakoitzean dauden partikula-kopurua; g_1 eta g_2 degenerazioak, hots, energia berdina duten egoera-kopurua.

Argi ikuskorren frekuentziako erradiazioa lortzeko, hots, $\lambda \approx 500$ nm, $\nu = 6 \cdot 10^{14}$ Hz, temperatura horretan, emisio espontaneoaren eta emisio estimulatuen arteko erlazioa, 1. ekuazioan ordezkatuz, zera litzateke, $3 \cdot 10^{12}$ gutxi gorabehera. Beraz, argi dago ezen sistema, oreka termikoan dagoen artean —eta orduan, $N_2 < N_1$ beti—, eta degene-

razioaren efektuak arbuatuz, emisio estimulatua ez da ia agertuko ikuskorrean, emisio espontaneoak goimaila despulatuko duelako. Bide-nabar, temperatura arruntetan erraz lortuko da emisio estimulatua, frekuentzia baxuko erradiazioekin, mikrouhinekin, adibidez; horrela, laserra aurretik **maser** delakoa eraiki zen, izen horren **ma** *microwave* delatik datorrelarik.



- prozesu erreaktiboa
- - -→ prozesu ez-erreaktiboa
- ==> Laserra

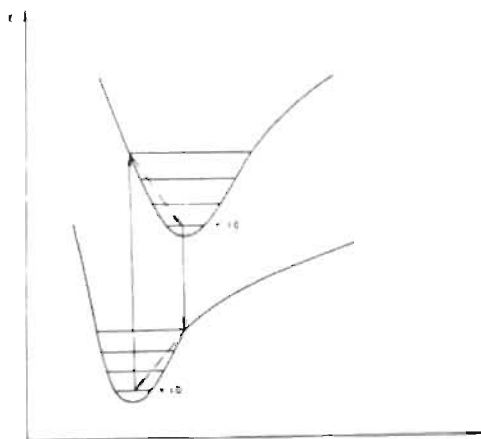
2. irudia: Laser-trantsizioak ahalbidetzen dituzten energi mailen egitura posibleak

Honelako sistemetan emisio estimulatua fenomeno nagusia gerta da, populazioaren inbertsioa lortu behar da, $N_1 < N_2$, hots, oreka termikoko egoera hautsi egin behar da, ez-orekara pasatuz. Honi, ponpeatze deritzo. Berau, sistemari argi-energia absorba eraziz egitea pentsatzen bada, populazio-inbertsioa ez da posible izango. Kontutan hartu, substantzia batek absorbatzen duen argi-intentsitatea, dI , $(N_1 - N_2)$ diferentziaren proportzionala dela (3), eta $N_1 = N_2$ denean, gehiago ez duela absorbatzen (asetasuna lortu da, sistema gardena da). Honegatik, bi mailetako sistemak ez dira kontutan hartzen laserren ohizko diseinutan. Normal-ki, hiru edo lau mailetako laserrak erabiltzen dira. Eskemak, 2. irudian ikus daitezke.



T.H. Maiman lehenengo laserrarekin

Populazio-inbertsioa efektiboago izan dadin, laser-efektua gertatzen deneko behe-maila energetikoak ahalik eta populazio baxuena izan behar du. Bestalde, ponpeatze-prozesua hasi orduko, maila populatuena, Boltzmann-en distribuzioaren arabera, behearena denez, hots, E_1 , 2. irudiko (a) eskemak, askoz energia gehiago beharko du, (b) edo (c) eskemak baino.



3. irudia: Molekula diatomiko lasergarri batean (adibidez, interhalogeno diatomikoak) laser-efektua lortzeko parte hartzen duten energi mailak.

Azken eskemaren irudikatze errealistago bat, 3. irudian ematen da. Molekula diatomikoen maila elektronikoki bi aurkezten dira, maila bibrazionalekin. Ponpeatzea, $v''=0$ delakotik, $v'>0$ delakora doalarik, zeren goi-mailaren potentzialaren kurbaren minimoa eskuinerago bait dago eta absorzioa oso bizkorra izanik ($\approx 10^{-15}$ s), molekulak ez bait du astirik bibratzeko edo deformatzeko (bibrazio-denbora, 10^{-13} s) (4).

Gero, $v'>0$ delakotik $v'=0$ delakora desaktibazio bibrazionala bizkorki gertatzen da, eta $v'=0$ delakotik $v''>0$ delakora, emisio estimulatua gerta daiteke —hots, laserra—, eta, berriro, $v''>0$ delakotik $v''=0$ delakora deaktibazio bibrazionalez, sistema behe-mailan aurkituko da. Honela populazio-inbertsioa segurtatuta egongo da, behe-maila beti huts edo ia huts egongo bait da.

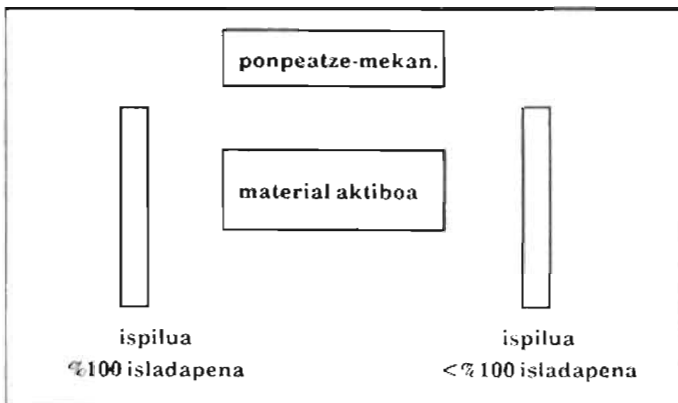
Energi diagrametarik funtzionatzen duten laserretara igartzeko egin behar den urratsa, nagusiki fisika aplikatuaren eta injineritzaren problema da, eta ez da hemen zehaztuko. Hala ere, laser baten eskema, 4. irudian ematen da, bertan erakusten direlarik laser baten atal garrantzitsuenak.

2.- LASER-MOTAK

Lehen laserraren material aktiboa, errubia izan zen. Orduetik hona milaka molekula lasergarri direla ikusi izan da; ponpeatze-metodoak ere hamarka kontatzen dira, eta funtzionamendua, ere, desberdina izan daiteke laser desberdinetan. Klasifikazioak beharrezkoak dira, eta hemen hiru klasifikazio-bideok erabiliko ditut, hots, material aktiboa, ponpeatze-metodoa eta funtzionamendua.

A) Material aktiboaren arabera

Laserrak material aktiboaren arabera, hots, material lasergarriaren arabera, bost mota desberdinetan klasifikatuko ditugu: solidoak, liki-



4. irudia: Laser baten eskema orokorra. Ispiluen funtzioa zera da, argia hutsgunetik zehar hainbat aldiz iragan eraztea, horrela argiak emisioa estimulatuz eta galera posibleak gaindituz. Laser-argia, isladapen partziala duen ispilutik ateratzen da.

doak, gaseosoak, erdieroalezkoak eta kimikoak.

A.1.- Laser solidoak

Lehendabiziko laserra, hots, errubi-laserra, era honetakoa zen, baina, oraindik erabiltzen den arren, gaur egun gutxi erabiltzen da, hobeagoak aurkitu izan bait dira. Honela, mota honetakoa laser hedatuena, Nd/YAG laserra da (YAG izena, *Yttrium Aluminium Garnet*-etik, Granate itriko-aluminikotik dator).

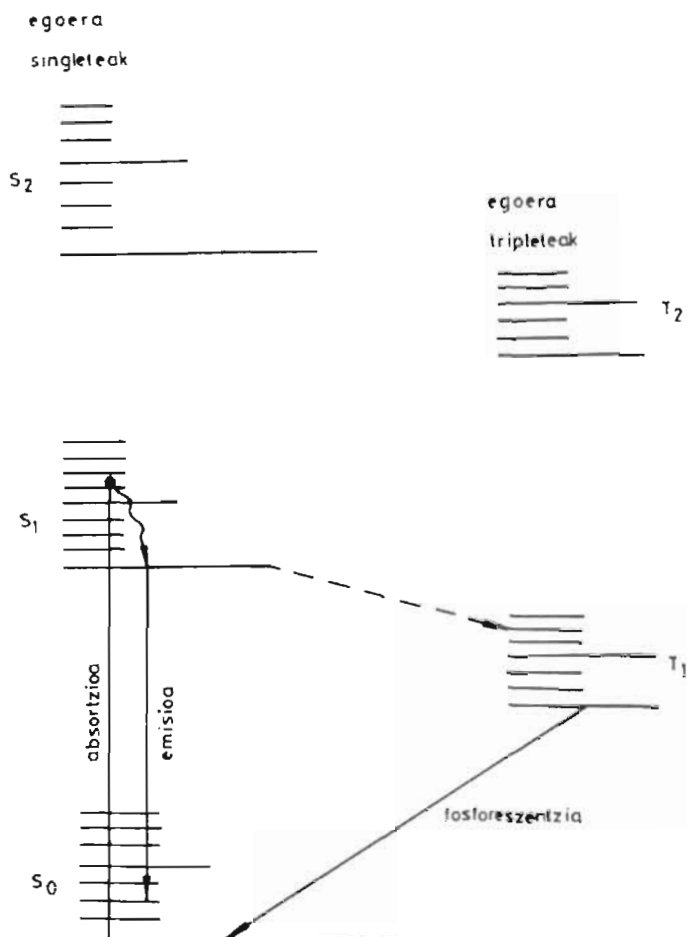
Laser hauetan, molekula laser-garriak kristal arrotzetan kontzentrazio oso baxutan daude, kristalaren molekulak ordezkaturik. Errubiaren kasuan, Cr_2O_3 delakoa, %0,05eko kontzentrazioan aurkitzen da, eta Nd/YAG laserraren kasuan, YAG-a, hots, $\text{Y}_3\text{Al}_2\text{O}_{15}$ -a, Nd^{3+} -az dopatzen da.

Funtzionamendu-eskemaren aldetik, errubi-laserrak 3 mailetako eskema bat osotzen du (2. irudia, (a) eskema), eta posible du bi uhin-luzera desberdinetan laserratzea, goi-maila - E_3 irudian - bikoitza delako; emisioaren uhin-luzerak 694,3 nm eta 692,8 nm dira, gorrian alegia.

Neodimiozkoak, aldiz, 4 mailetako eskema bat osotzen du (2. irudia, (c) eskema), eta laser-emisioaren uhin-luzera 1064 nm-tan aurkitzen da, infragorrian, alegia.

A.2.- Laser likidoak

2. eta 3. irudiak ikusita, laser-erradiazioa soilik energia-maila determinatuen artean gertatzen dela pentsatzea, eta horrela, frekuentzia bakarra edo bakan batzu soilik agertuko direla pentsatzea zilegi da, hots uhin-luzera edo kolore bakarrak



5. irudia: Koloratzaile baten energi maila tipikoak.

agertzea substantzia lasergarri ba-koitzarentzat. Honek galdera bat egitera eraman gaitzake: Posible da frekuentzi tarte zabal bateko frekuentzia guztiak jarraikiro beteko lukeen substantzia lasergarriren bat aurkitzea?

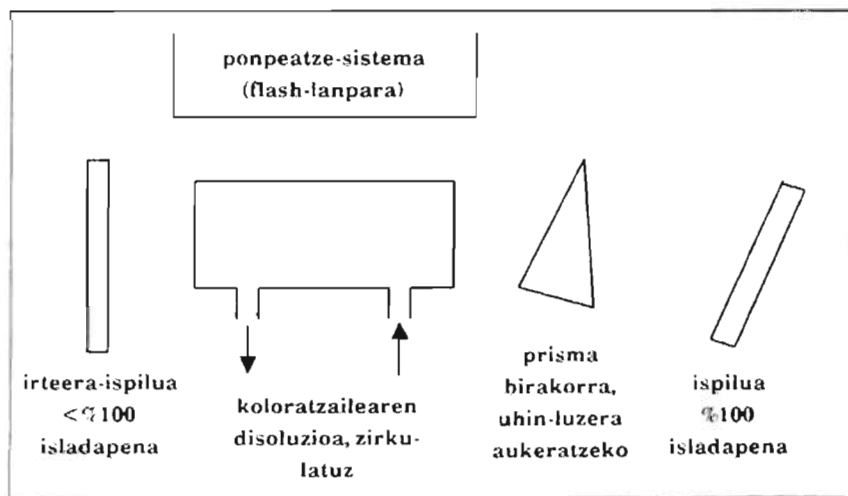
Erantzuna baiezkoa da, 1966.etik hona, eta laser likidoak edo kolo-

ratzaile-laserrak dira. Laser hauetan, substantzia aktiboa koloratzaile bat da, hots, molekula organiko fluoreszente bat, egoki den disolbatzaile likido batean disolbatuta. Hortik, **laser likido** izena. Koloratzaileen frekuentzia-sintonizagarritasuna, beraien energi-mailaren eskemaren bidez azal daiteke, beste laserren desberdina bait da (ikus 5., irudia). Mole-

kula hauek bi eratako energi mailak dituzte, singleteak eta tripleteak. Maila elektronikoko bakoitzak, maila bibrazionalak eta errotazionalak ditu, eta azken hauek, hain elkarren hurbil egonik, ez daude bereiztuta, eta praktikan *continuum* bat osotzen dute.

Funtzionamenduaren eskema honelakoa da. Absortzioa —ponpeatzea behe-maila bibrazionaletik goi-maila elektronikora gertatzen da. Hemen-dik, oso bizkor, goi-maila elektroni-

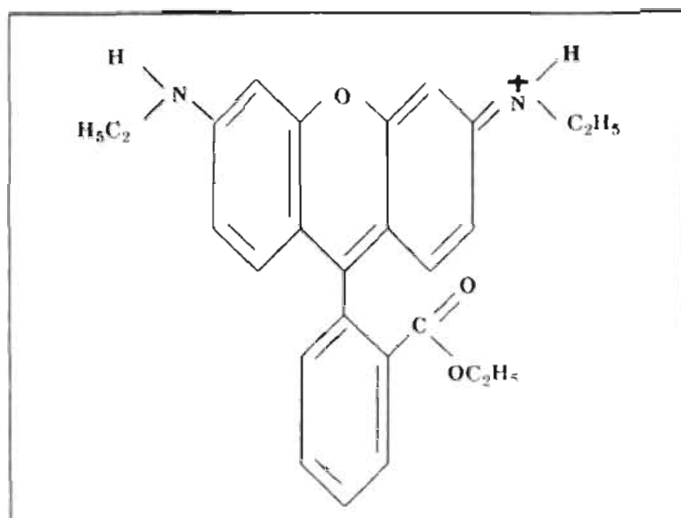
koaren behe-maila bibrazionalera desaktibatzen da, eta hau ohi da laser-erradiazioaren goi-maila. Emisioa, fluoreszentzia, behe-maila elektronikoren edozein maila erroto-bibrazionalera gerta daiteke, frekuentzi tarte zabal bat betez. Alderdi hone-tatik, 4 mailetako eskemaren antzekoa da. Frekuentzia konkretu bat aukeratzeko, beharrezko izango da laserraren eskeman frekuentzia au-keratzeko sistema bat sartzea, eta ahalmen hori duten laserren eskema orokorra, 6. irudian ikus daiteke.



6. irudia: Koloratzaile-laser baten eskema. Zenbait kasutan, prisma eta ispilu isladatzailea, difrakzio-sare batez ordezkatzen dira.

Edonola ere, dena ez da perfektua. Zenbait problema teoriko eta praktikoko agertzen dira laser hauek erabiltzerakoan. Adibidez, koloratzaile-maila energetikoetan tripleteak agertzen dira, eta singlete-triplete trantsizioa teorikoki debekatuta dagoen arren, partzialki baino ez da horrela praktikan, eta tripleteetara pasatzen diren molekulak ez dira lasergarriak. Bestalde, koloratzaile

bakoitzak frekuentzi tarte bat baizik ez du betetzen, 25-30 nm inguru, eta ikuskorreko (eta UV eta IR hurbilak) frekuentzia guztiak betetzeko, 300-1000 nm tartarako, koloratzaile-andana oso bat behar da. Hauek, mota hauetakoak ohi dira. Poliminoak (700-1000 nm), xantenoak (500-700 nm), kumarinak (400-500 nm) eta izarniadurazkoak ($\lambda < 400$



7. irudia: Rodamina 6G delakoaren egitura molekularra. Egitura honek azaltzen du maila energetikoen hurbiltasuna. Hau da gehien erabiltzen den laser-koloratzailea, 565 nm inguruan emititzen duena, frekuentziek, disolbatzailez, kontzentrazioz eta abarrez dependitzen dutelarik.

nm). Erabiliena, Rodamina 6G delakoa da, beraren egitura, 7. irudian ikusten delarik.

Beste problema bat disolbatzaile egokiaren aukeratik dator. Koloratzaile desberdinek disolbatzaile desberdinak eskatzen dituzte, eta horrek sistema praktikoa korapilotsuagoa egiten du. Halaber, kontutan hartu behar da koloratzaileok ez direla egonkorak eta erabileraren arabera, lasergarri ez diren materialetan dekonposatzen direla. Hala ere, abantailak gehiago dira desabantailak baino, eta erabilpen handia dute.

A.3.- Gas-laserrak

Gas-laserrak, material aktibo bezala gasak dauzkate eta beraien ar-

tean mota desberdinak badaude. Baina eta labur ikusiko ditugu.

a.- atomo neutroen laserrak

Arruntena, eta garrantzitsuena, He-Ne laserra da. Bertan, neonaren presioa, 0,1 Torr ingurukoa da, eta helioarena, 5-10 aldiz handiagoa. Parte hartzen duten energi mailak neonarenak dira, helioak lagundu egiten duelarik neonaren populazio-inbertsioa lortzen. Hiru frekuentzietan eman dezakete laserra, baina normalki 633 nm-tan erabiltzen da, gorrian.

Mota honetako beste laser batzu, gas nobleen nahasketen laserrak dira, eta normalki infragorri hurbilean laserratzen dute.

b.- ioi-laserrak

Hauetan, substantzia lasergarria ioi bat da, ioiaren (eta ez atomo neutroaren) enegi mailek parte hartzen dutelarik. hauen artean, bi mota nagusi daude: gas nobleen ioien laserrak (garrantzitsuena, Ar^+ laserra, 14 15 lerro edo frekuentzia desberdinetan laserratzen duena) eta bapore metalikoen laserrak (garrantzitsuenak, **Kadmio** eta **Selenio** laserrak direlarik).

c.- laser molekularrak

Hauetan, molekulen maila elektronikoez parte hartzeaz gain, maila errotazionalek eta bibrazionalek ere parte hartzen dute. Posibilitateak asko dira, adibidez, maila elektronikoen beraren maila bibrazional desberdinen artean; hauetan, laser-emisioaren uhin-luzera infragorrian aurkitzen da (5-300 μm). Beste posibilitate bat, maila elektronikoen desberdinek parte hartzen dutenean gertatzen da, eta orduan emisioa ikuskorrean edo ultramorean gerta daiteke.

Mota honetako laser ezagunena, Karbono(IV) oxidozko (CO_2) laserrak dira. Hauetan, CO_2 aren maila erroto-bibrazionalek parte hartzen dute, eta beraiekin potentzia handienak lortu izan dira, eta efizientzia oso alturekin, hots, laser-erradiazioaren potentzia zati ponpeatzean erabilitako potentzia, %15-20 da. Industrialki erabiltzen da nagusiki.

Beste antzeko laser batzuk, Karbono(II) oxidozko (CO) eta hidrogeno

zianurozko (HCN) laserrak dira, askoz gutxiago erabiliak.

Nitrogeno-laserra da maila elektronikoen desberdinak erabiltzen dituen bere desarran, 337 nm-tan, ultramore hubilean, eta aipagarri da ere hidrogeno-laserra, zeinak $\lambda = 116$ nm-tan emititzen bait du, lortu den uhin-luzera laburrenekoa berau, hutseko ultramorean (VUV, *vacuum ultraviolet*).

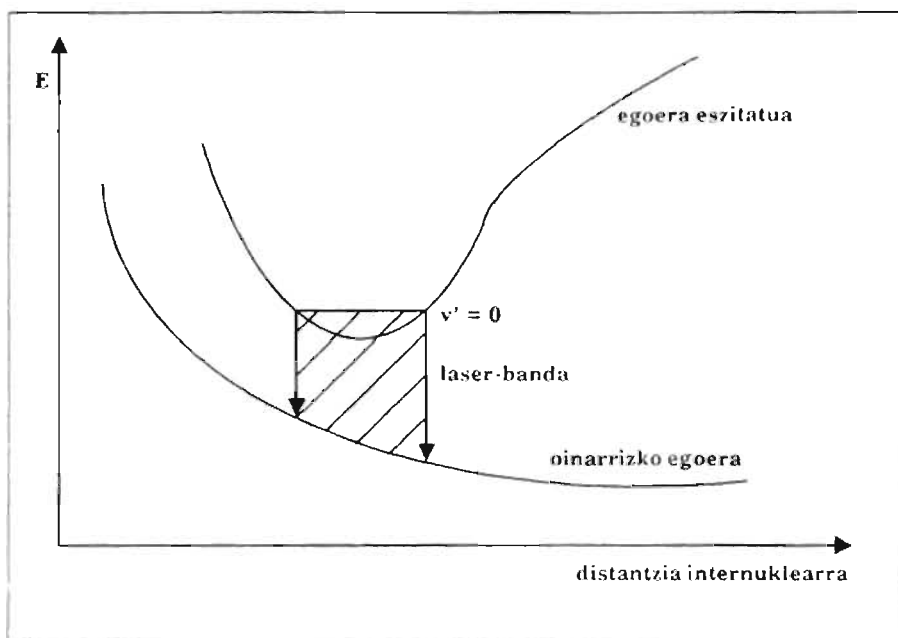
d.- eszimeroen laserrak

Laser hauek zertxobait desberdinak dira besteekin konparatuta, zeren parte hartzen duten molekulek ez bait dute oinarrizko egoera lotzailerik, baina bai egoera eszitatuetan, hala nola ArF^+ edo XeCl . Izena, excimer hitzetik dator, *excited dimer*, egoera horren adierazle. 8. irudian ikus daitezke parte hartzen duten energi mailak.

Goi-egoera eszitazioa distantzia internuklear desberdinetan agertzea, eta beraz, uhin-luzera desberdinetan, ahalbidetzen du sintonizazio txiki bat. Adibidez, Xe_2^+ delakoaren laserretan, emisioaren uhin-luzera 173 nm-takoa da, eta 5 nm-tan sintonizagarri da.

A.4.- Erdieroaleen laserrak

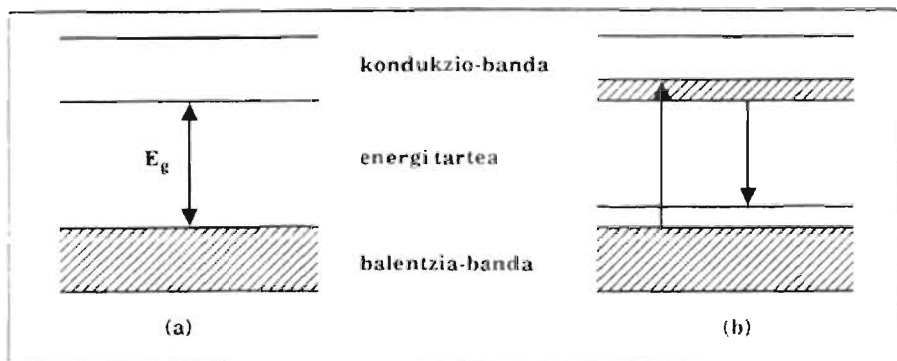
Laser hauek aurrekoekiko desberdinak dira, zeren, hauetan substantzia lasergarria ez bait da atomo edo molekula bat, baizik eta kirstal oso bat. Orduan, ezin daiteke atomo edo molekula bakarren energi mailez,



8. irudia: Eszimeroen laser batean parte hartzen duten energi mailak.

hitz egin eta, kasu honetan, mailak baino bandak dira. Erdieroale baten energia-bandak, 9. irudian ematen dira.

Erdieroaleen laserrek hobe egiten dute lan temperatura baxutan, eta tarte labur batean sintonizagarri dira.



9. irudia: a) Erdieroale baten bandak, $T=0$ K-etan, elektroiak balentzi bandan aurkitzen dira, eta kondukzio-bandan ez dago elektroirik. b) Baldin zenbait elektroik kondukzio-bandara eramaten badira, berriz itzultzeko joera izango dute, eta, trantsizioa erradiantea bada, eta zenbait baldintza betez, posible da laser-efektua lortzea.

A.5.- Laser kimikoak

Laser hauen ezaugarri nagusia zera da, material lasergarria erreakzio kimiko baten ondorio dela. Zenbait erreakzioren produktuak eszimatatuak agertzen dira, eta desesztatizioa erradiantea bada, posible da laser-efektua lortzea.

Aipagarrienak zerak dira, iodo atomikoaren laserra, zeina molekula iodoorganikoen apuruduran $2P_{1/2}$ egoeran sortzen bait da, eta oinarritzko $2P_{3/2}$ egoerara pasatzerakoan $1,315 \mu\text{m}$ -tan laserraten bait da, eta HF laserra, zeina $\text{H}_2 + \text{F}_2$ erreakzioaren ondorioz, maila bibrazional eszimatuetan agertzen bait da, eta desesztatizio erradiantean, $3-10 \mu\text{m}$ tartean laserra sor bait daiteke.

B) Ponpeatze-prozesua

Populazio-inbertsioa lortzeko zenbait metodo desberdin erabiltzen dira, sistemaren ezaugarrien arabera. Nagusienak hauek dira:

B.1.- Lanparak

Hauek argi zuri-ultramore oso indartsua emititzen dute, eta material lasergarriak parte bat absorbatzen du, eszimatuz. Efektiboa izateko, eta populazio-inbertsioa nahikoa lortzeko, derrigorrezko da material aktiboaren absorptzio-banda zabala izatea; hori gertatzen da likidoekin (koloratzaileekin) edo solidoekin.

Lanparak, flashak (Xenon-lanparak) edo jarraiak (Wolframio-lanparak) dira, sistemaren arabera, eta

lanparek jartzen diote laser-mota honi potentzia-muga.

Halaber, posible da laser baten ponpeatze-metodoa beste laser bat izatea; hori gertatzen da, adibidez, Nd/YAG laserrak edo N_2 -laserrek ponpeatutako koloratzaile-laserrekin. Hori eginik, flexibilitate handiko bi laserrez osotutako sistemak lortzen dira.

B.2.- Korronte elektrikoa

Posible da material lasergarrien zehar korronte elektrikoa pasa araziz, ionizaizioak eta kolisioak lortuz, material aktiboa eszimatzea. Hau da prozedura nagusiena gas-laserretan eta erdieroaleen laserretan. Hauetan, korrontearen intentsitatea edo elektrodoen arteko potentzial-diferentzia izaten da potentzi muga.

B.3.- Metodo bereziak

Zenbait kasu berezitan, laser-efektua lor daiteke ponpeatze-metodo bereziez. Hemen sar daitezke, adibidez, laser kimikoak. Aipatzekoa da ere zesio metalaren baporearen laserra, zeina posible bait da optikoki ponpeatzea helio-lanpara baten bidez, zeren, kasualitatez, oso absorptzio handia ematen baitu helioaren emisio-lerro batzutan.

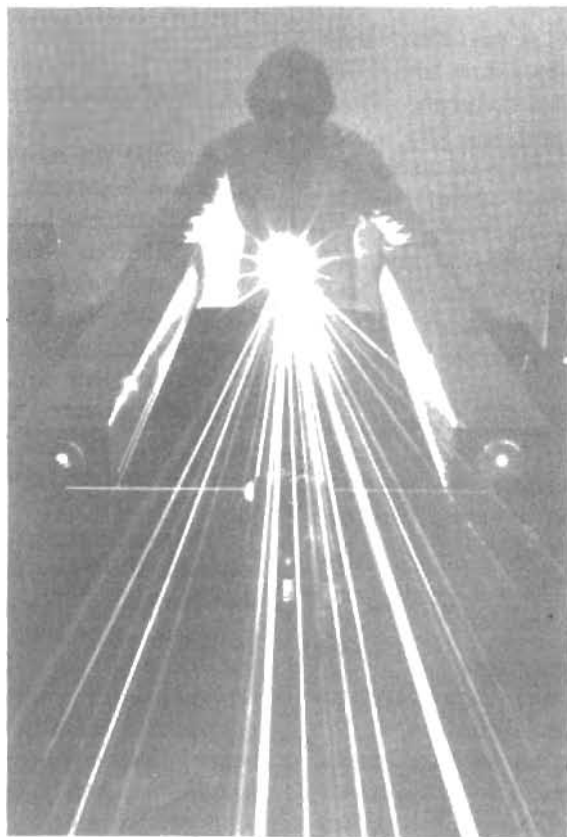
C) Funtzionamendua

Laserrek funtzionatzeko bi era nagusi dituzte, jarraia eta desjarraia. Lehen eran, laser-izpiak jarraitasun denborala du, eta bigarrenean, izpia taupadaka, pultsuka agertzen da, eta

laser hauetan zehaztu egin behar da pultsuaren iraupena eta pultsuen arteko denbora-tartea, hots, maiztasuna.

Laser bat jarraia edo desjarraia egiten duen baldintza zera da: pon-

peatze-prozesurako molekula laser-garriek energia absorbatzen dute, eta honekin batera temperatura igoten da. Horrela, energia-soberakina askatzeko bide bizkor bat egon behar da, bestela deusezte termikoa gerta baitaiteke.



BIBLIOGRAFIA

- 1.- J. Iturbe, *Elhuyar*, 10. zenb., 1977.eko Martxoa, 46. o.
- 2.- W. Demtroder: "Laser Spectroscopy. Basic Concepts and Instrumentation", Springer-Verlag, Berlin (1982).
- 3.- O. Svelto: "Principles of Lasers", Heyden, London (1976).
- 4.- K.K. Rohatgi-Mukherjee: "Fundamentals of Photochemistry", J. Wiley, New Delhi (1978).