

Laser sintonizagarriak: Titanio:zafiro laserraren sintonizazioa kristalaren beraren birrefringentziaz baliatuz

*Ignacio Iparraguirre, Jon Azkargorta eta
M. Asunción Illarramendi*

Fisika Aplikatua I, Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Urkixo zumarkalea z/g, 48013 Bilbao
i.iparraguirre@ehu.es

Laburpena: Lan honetan, laser sintonizagarrien (hau da uhin-luzera aldakorra duten laserren) funtzionamenduaren ezaugarriak laburbilduko dira eta adibide gisa, gailu jakin baten garapena aurkeztuko da. Laser sintonizagarri honen berezitasun nagusia bere sinpletasunean datza: laserraren igorpena lortzeko kitzikatzen den materiala (material aktiboa) eta sintonizatze efektua eragiten duen osagaia bat dira, alegia anplifikazioa eta sintonizazioa osagai bakarrekin lortzen da alegia. Sintonizazioaren eragileak kristalaren propietate birrefringenteak dira.

Hainbat material gai diren arren, Ti:zafiro kristala aukeratu dugu, ikuspegi praktikotik erakargarriena delako. Ti:zafiro laserraren uhin-luzeraren «autosintonizazioa» bere igorpen-bandan lortu dugu sintonizatze efektua delako prozedura hori erabiliz. Teorikoki kalkulaturako sintonizazioaren uhin-luzerak eta igorpenaren beste ezaugarriak nahiko ados daude esperimenduetan neurtutakoekin.

Ikuspegi praktikotik gailu hau erresonadorearen barneko osagai sintonizatzaileak erabiltzen ez delarik, merkeagoa eta eraginkorragoa da eta efizientzia irabazi. Bere trinkotasuna dela medio, beste sistema konplexuago batzuetan erabil daiteke akoplatuta eta bereziki interesgarria izango da laser jarraietan erabiltzeko.

Abstract: In this work, main properties of lasers and tuning devices are briefly summarized. As an example, wavelength tuning in a broadband-emitting Ti: sapphire laser crystal based on its own birefringence properties is presented. To investigate the tuning characteristics of the spectral filter, we have used Jones-Vector formalism. The calculated wavelength-selective tuning matches very precisely the experimental observations.

1. LASERREN OINARRIAK

Laserra argi koherentearen iturria da. Koherente delako termino honek adierazten du igortzen diren fotoi guztiak egoera berebanean daudela, teori-koki behintzat, hots, norabide berberarekin sortzen dira guztiak, eta uhin-luzera eta fase berarekin ere bai. Propietate hauek aplikazioen aldetik oso eremu zabala irekitzen dute, zeren eta argia monokromatikoa izateaz gain, sorta bera asko kontzentratzeko posibilitatea sortzen baitu bai espazioan eta bai denboran.

Laser-argia lortzeko, elkarren paralelo kokatutako bi ispiluz baliatzen gara kasurik errazenean; ispiluek lehentasuna ematen diote norabide jakin bati, norabide horren paralelo igorritako fotoiak besteetan igorritakoak baino askoz gutxiago galtzen dira horrela osatutako erresonadoretik, eta fotoien oinarritzko propietateak direla medio, igortzen diren fotoi berriak norabide horretan igortzen dira batez ere. Noski, laserraren barruan material aktibo bat izan behar dugu (ikusi 1. irudia) bi ispilu horien artean. Kitzikatu eta gero fotoiak igortzen dituen edozein material erabil daiteke material aktibo modura; igortze prozesu horri fluoreszentsia deritzo eta material bakoitzean uhin-luzera ezberdin eta anitzetan gertatzen da. Uhin-luzera tarte honi fluoreszentsia espektroa edo banda deritzo. Askok dira horrelako propietateak erakusten dituzten materialak, solidoak, likidoak zein gasak. Oso kalitate optiko ona izan behar dute beti; honek esan nahi du zeharo gardenak izan behar direla, dispersiorik eta zurgapenik gabekoak laser igorpenaren uhin-luzeretan. Materiala kitzikatzeari ponpaketa prozesua deritzo eta bide anitz daude hau lortzeko: deskarga elektrikoak edo erreakzio kimikoak, tipikoki gasetan, edo lanparak edo beste laser batez likido eta solidoetan. Batzuetan ponpaketa prozesua jarraia da, erabiltzen den ponpaketa-potentzia denboran konstante denean, eta beste batzuetan pultsatua, ponpaketa-energia oso denbora laburrean sartzen denean. Kasu hauetan laserraren igorpena bera ere pultsatua da eta normala izaten da igorpen hori denboran atzeratua irtetea ponpaketarekiko.

Laserraren propietateak direla medio, igortzen den argiaren uhin-luzerak fluoreszentsia espektroaren barruan daude, baina bere espektroa askoz estu-agoa da, eta uhin-luzera kopuru txikiagoa igortzen da edo argia naturala baino monokromatikoagoa da. Besterik ez badago, fluoreszentsia-bandako maximoaren inguruko uhin-luzerak dira igortzen direnak, baina hori ere neurri batean alda daiteke ispilu bereziak erabiliz edo beste bide bat erabiliz. Orokorrean uhin-luzera hori ez da aldatzen ispiluak edota beste osagairen bat ez bada aldatzen.

2. LASER SINTONIZAGARRIAK

Laserra sintonizagarria izatea da beste aukera bat. Prozedura honek bide berriak zabaltzen ditu zenbait arlotan, batez ere zientzia-arloetan, zeren eta horrelako laserren bitartez, aukera egoten baita edozein material oso era selektiboan kitzikatzeko. Bere kasa, laserrak fluoreszentsia-maximoaren inguruan igorriko du, baina bere barrenean uhin-luzeran selektibo den osagai bat sartzen badugu, uhin-luzera jakin batean galerak gutxituz eta beste guztietan handituz, lor daiteke igorpenaren uhin-luzera aukeratzea fluoreszentsia bandaren barne. Difrakzio-sareak eta filtro birrefringenteak dira batez ere horretarako erabiltzen diren osagai optiko tipikoak. Guztiak dira dinamikoak, hau da, nahikoa da osagaiaren inklinazio edo orientazio bat aldatzea, laserraren funtzionamenduan beste ezaugarriarik aldatu gabe, aukeratutako edo sintonizatutako uhin-luzera alda dadin. Difrakzio-sareak osagai dispertsiboak dira, hau da, adibidez sarearen lehenengo ordenan lan egiten bada, erasotako izpiek uhin-luzeraren arabera norabidea izango dute islapenean; sarearen orientazioaren arabera uhin-luzera bakar batek izango du erresonadorearen ardatzaren norabidea eta bera izango da sintonizatutako uhin-luzera. Filtro birrefringenteek berriz, material birrefringente (edo anisotropo) batez egindako lamina plano-paraleloak dira eta beste era batera dihardute. Material hauek argiaren polarizazio-norabidearen arabera errefrakzio-indize desberdinak dituzte eta horrek atzerapen ezberdinak sortzen ditu hedapenean polarizazio ezberdinetarako. Horren ondorioz laginetik ateratzen den argiaren polarizazio-egoera orokorrean ez da sarrerakoa. Horretaz gain, bere erasoan polarizazioko bi osagaiak, eraso-planoaren norabide paralelo eta perpendikularra, galera ezberdinak dituzte, eta beraz argia polarizatu egiten da xafla zeharkatzean. Badago eraso-norabide bat, non argiaren polarizazio-norabidea eraso planoaren paralelo bada ez baitago galerarik. Eraso-angelu horri Brewsterren angelua deritzo eta kasu honetan gertatzen da polarizatzeko efektu horren maximoa.

Sintonizazioa gertatzen da, kristalaren anisotropia eta xaflaren gainazalak eragiten duen polarizatzeko efektu konbinatua dela medio. Eraso angelua Brewsterren angeluaren ingurukoa bada, eraso-planoko polarizazioak galera askoz txikiagoak jasaten ditu besteak baino. Beste alde batetik, kristalaren anisotropiak, atzerapen ezberdinak (δ_1 eta δ_2) sortzen ditu eremuaren bi norabide nagusietako osagaietan, eta horrek aldatu egiten du uhinaren polarizazio egoera kristalaren barnean. Bi osagaien arteko atzerapen erlatibo $\Gamma = \delta_1 - \delta_2$, xaflaren lodieraren, λ uhin-luzeraren eta sintonizazio ϕ angeluaren mendekoa da (ikus 1. irudia). Sistemaren transmitantzia maximoa izango da, uhinaren polarizazioa kristalaren barnean aldatzen ez denean, eta

beraz λ_{\max} uhin-luzera horri, atzerapena 2π -ren multiploa dagokiobean: $\Gamma(\lambda_{\max}, \varphi, \dots) = 2m\pi$ ($m \in \mathbb{Z}$).

Laser sintonizagarriak oso beharrezkoak dira zientziaren eta teknologiaren arlo askotan. Hala ere eragozpenak dituzte banda estuan igortzeko eta aldi berean sintonizazio-tarte zabala mantentzeko. Aurretik esan dugunez, horrelako gailu guztietan maiztasun-sintonizazioa laserraren barrunbean lortzen da, xafla birrefringente inklinatuak edo difrakzio-sareak erabiliz, [1-4]. Baina barrunbean jartzen diren elementu hauek konplexutasuna eta kostua handitu eta laserraren efizientzia gutxitzen dute. Horrez gain, gailu hauek, kalte-ataria txikia dutelarik, mugatu egiten dute laserraren irteerako energia. Egileek, orain dela gutxi plazaratu dute uhin-luzeraren sintonizazioa lortzeko metodo erraz bat. Metodo hau laserraren kristalaren birrefringentzia datza; kristal aktiboa bera erabiltzen da osagai sintonizatzaile gisa, metodoa oso eraginkorra da banda zabaleko laser pultsatu sintonizagarrietan uhin-luzera aukeratzeko [5].

Gaur egun, titanioz dopatutako zafiroa da solido-egoerako laser sintonizagarrietan erabilitako materialen artean interesgarrienetako bat, bere fluoreszentzia-banda zabala delako, 680 nm-tik 1100 nm-rainokoa. Bestalde, sintonizazioa lortzeko erregimen pultsatuetan, hauek dira laser mota honen desabantaila handienak: irabazia altua eta fluoreszentzia-denbora nahiko laburra ($3.2 \mu\text{s}$) [6].

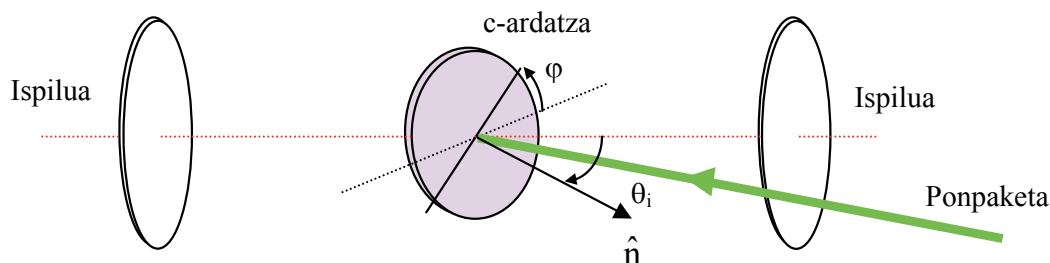
Lan honetan agerian utziko dugunez, esperimentalki froga daiteke laser pultsatuaren uhin-luzera sintoniza daitekeela banda zabalean, kristalaren bere birrefringentziaz baliatuz. Horretaz gain, gailuaren jarduera azaltzeko bere propietate birrefringenteetan oinarritutako tratamendu teoriko bat garatuko dugu.

3. GURE MUNTAIA ESPERIMENTALA

Laser-igorpen sintonizatua lortzeko, lehenik, materialaren ezaugarriak aukeratu dira: titanio-zafiro ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) kristalezko lamina zirkularra, Roditi I. C. L. konpainiak ekoitzia, 8mm-ko diametrokoa eta 0.5 mm-ko lodierakoa, Titanioz dopatua %0.25, eta c-ardatz optikoa laminaren planoarekiko paraleloa.

1. irudiak erakusten du lagina nola ponpatzen den, Nd:YAG laser bikoiztu batekin (532 nm). Uhin-luzera horretan laginaren zurgapen-koefizi-

entea 3.0 cm^{-1} ingurukoa da [7]. Ponpaketa-pultsuak, linealki polarizatuak dira plano horizontalean, 10 ns-ko iraupenarekin.



1. irudia. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ laser autosintonizatuaren eskema: erresonadorearen eta ponpaketa-energiaren erdiko lamina, osagai aktiboa da eta gure muntaian, baita sintonizatzaileraren ere.

Erresonadorearen osagaiak, hauek dira: lagina bera, Brewsterren angeluan kokatuta ardatzarekiko ($\theta_i \approx 60^\circ$), eta bi ispilu, biak islapen handikoak; ispiluak transmititzen duen erradiazioa da aztertzen dena. Erradiazioa sintonizatzeko, lagina bera biratzen da norabide normalaren inguruan, hau da φ angeluaren arabera.

Gure muntaian ponpaketa-energiaren norabidea erresonadorearen norabidetik ahalik eta gertuen kokatu da baina ez gertuegi, erresonadorearen ispilu biak ponpaketa-energia altutik babesteko. Ponpaketa-izpiak 9 mm-ko diametroa du baina fokalizatu egiten da 50 cm-ko fokaleko lente batekin, lagina baino 15 cm atzerago; horrela ponpaketa-irradiantzia handiagoa lortzen da baina ez da lagina kaltetzen. Erresonadorearen luzera 15cm-koa da; bestetik, konfokal simetrikoa da, alegia ispiluen kurbadura-erradioak ere berdinak dira eta 15 cm-koak. Ispiluen islapen-koefizientea %95 baino handiagoa da titanioaren igorpen-espektroaren zabalera osoan, alegia, 735-875 nm-ko tartean.

Laser-igorpena lortu da 50mJ-ko ponpaketa-energia ataritik gora, laginaren posizioa $\varphi=45^\circ$ denean. Esaterako, 210mJ-ko ponpaketa-energia erabiltzen denean, $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ laser-igorpeneko pultsuaren denborazko ezaugarriak hauek dira: 20ns-ko iraupena eta ponpaketa-pultsuarekiko 90 ns-ko atzerapena.

Igorpenaren espektroa neurtu eta erregistratzeko Jobin Ivon TRIAX 190 monokromadorearen erabili da eta bere irteeran, Hamamatsu InGaAs diodo ilada bat. Aparatu horrekin pultsu bakarraren espektro osoa lortzen da, 0.5 nm-ko zehaztasunaz. Espektroaren goi mailako zehaztasuna lortzeko, metro bateko fokaleko monokromadore luzea erabili da eta Hamamatsu fotobiderkatzaile bat. Sistema horrekin 0.16 Å-ko zehaztasuna lortu da.

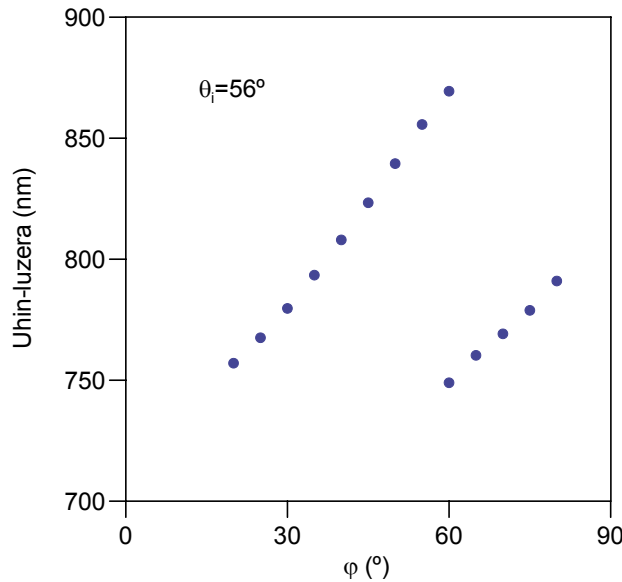
4. SINTONIZAZIOA

Ti:Al₂O₃- kristalaren laser igorpena sintonizatu egiten da, alegia, igorpen-espektroaren uhin luzera aldakorra da, φ angeluaren arabera, eta laser-igorpena sintonizatzea lortu dugu 750 nm-tik 870 nm-rainoko tarte osoan, eta 2. irudiak erakusten duen bezala. Baldintzak: $E_{in}=210$ mJ eta $\theta_i=56^\circ$.

Irudi horretan bi sintonizazio-ordena ageri dira. c-ardatzak eraso-planoarekiko (horizontalarekiko) 20°-ko angelua osatzen duenean lortu da laser-igorpenaren gailurraren uhin-luzerarik motzena. Gainontzeko espektroak pausoka lortu dira, laginaren posizio angeluarra $\Delta\varphi=5^\circ$ biratuz pauso bakoitzean.

Angelua 20 gradu baino txikiagoa edota 80° baino handiagoa denean, sintonizatu gabeko laser-igorpena lortzen da: espektro zabalagoa eta bere gailurra ia finkoa (780nm inguru) eta, hain zuzen filtrorik gabeko laser-igorpena bezalaxe, laginaren φ posizio angeluarra biratu arren.

Laser-igorpenaren energia altuagoa da φ angelu txikietan φ angelu handietan baino, eta ponpaketa energia hiru bider baxuagorekin lortzen da ataria. Hau gertatzen da zurgapen-koefizientea eta igorpen espontaneoko sekzio eraginkorrek polarizazio-planoaren arabera ezberdinak direlako; c-ardatzaren paraleloa den osagairako handiagoak dira, gutxi gorabehera beste osagaien balio bikoitza dute [6,8].



2. irudia. Ti-zafiro laserraren autosintonizazioaren tarte, φ angeluaren menpe ($\theta_i = 56^\circ$)

5. UHIN-LUZERAREN SINTONIZAZIOAREN DOIKETA TEORIKOA

Sintonizazio-kurben adierazpena honela kalkulatzen da [9,10]:

$$\lambda_{\max}(\varphi) = \frac{e}{m} \left[n_e \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i \left(\frac{\sin^2 \varphi}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{n_o^2} \right)} - n_o \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_i}{n_o^2}} \right] \quad (1)$$

non e xaflaren lodiera den, θ_i eraso angelua, eta n_o eta n_e kristalaren bi errefrakzio indize nagusiak, hurrenez hurren 1.762 eta 1.770.

Adierazpen horrek ematen dituen emaitzak eta 2. irudiko sintonizazio-malda esperimentala ez daude guztiz ados (3.4 eta 3.0 nm/gradu hurrenez hurren), eta desberdintasun hori ezin da azaldu xaflaren lodiera, ardatz optikoa edo eraso-angeluaren tolerantzien bitartez. Azalpen ona aurki daiteke ordea, laser-igorpenaren maximoari dagokion λ_{\max} uhin-luzeraren portaera aztertuz ponpaketa energiaren mende. 3. irudian ikus daiteke uhin-luzera horren balioa konstante izan beharrean, gora doala ponpaketa energia igotzen dugun heinean. Beste parametro esperimental guztiak finkatuta daudenez ($\theta_i = 56^\circ$, $\varphi = 45^\circ$), emaitza horrek aditzera ematen du errefrakzio indizeak ponpaketa-energiarekin batera aldatu egiten direla eta indize horien ez linealtasuna agertzen dutela. Orduan eremuaren intentsitatearen aldaketak, erresonadorearen barruan aldaketa txiki bat sortuko du kristalaren errefrakzio indizeetan, eta beraz, bere birrefringentzian. Hortaz $\Gamma(\lambda_{\max}) = 2m\pi$ baldintza λ_{\max} beste uhin-luzera baterako beteko da.

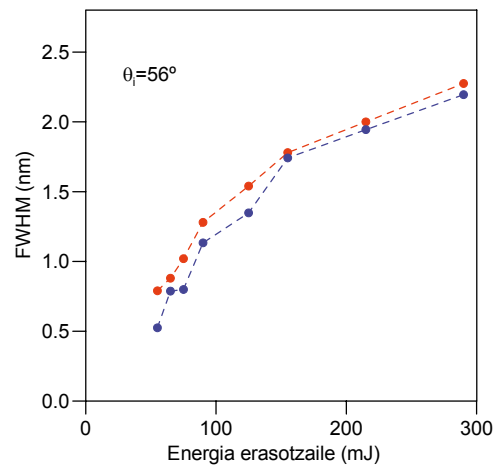
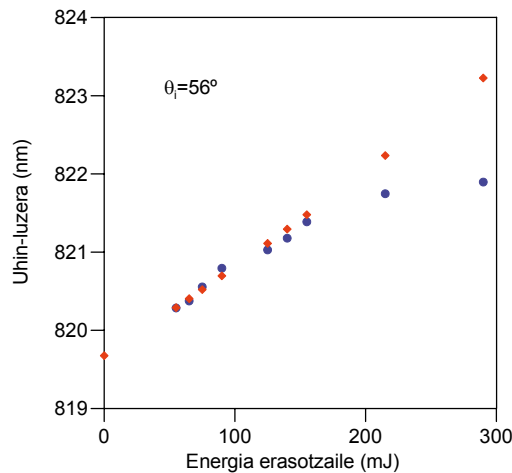
Efektu horrek halabeharrez eragingo dio 2. irudiko sintonizazio grafikolari eta beraz, ondo uler dezakegu zergatik ez diren erabat sintonizazio zuzenaren malda esperimentala eta (1) adierazpenetik ateratzen dena. Bide hone-tatik, baieztatu egin dugu errefrakzio indizeen aldaketak sortzen dituen ez dela zuzenean ponpaketa energia edo tenperatura, laserrak berak igortzen duen intentsitatea baizik. Xafla pasiboen bitartez galera kontrolatuak erresonadorearen barnean sartuz eta ponpaketa energia aldatu gabe egin da baieztapen hori. Horrela lortzen da ponpaketa energia aldatu gabe da laserraren intentsitatea aldatzea eta behatzen da laser intentsitate hori zenbat eta txiki-agoa izan, orduan eta antz gehieago dutela malda esperimentalak (2. irudia) eta teorikoak (1).

Honen ondorioz, saio bat egin dugu errefrakzio indizeen aldaketa txiki horiek sintonizazio-malda esperimentala azaldu ote dezaketen finkatzeko.

Emaitza ona lortu dugu. Doiketa egokia lortzen da errefrakzio-indizeen aldaketan balio errealistak erabiliz ($\Delta n \cong 10^{-4}$), material horretako efektu ezlinealen ordenakoak.

Modu berean doitu da λ_{\max} -en ponpaketa energiarekin mendekotasuna, eremuaren intentsitatea erresonadorean gutxi gorabehera ponpaketa energiaren proportzionala dela suposatuz. 3. irudiak erakusten du doiketa ona dela, ponpaketa energia oso handia ez den bitartean. Gainera, doiketa honetatik eta 210 mJ-eko ponpaketa-energiarako ateratzen diren errefrakzio indizearen aldaketak bat datoz lehen egindako sintonizazio maldarako doiketarekin. 3. irudian behatzen den ponpaketa energia altuetarako asetasun efektua, oinarrizko egoera hustearekin uztar daiteke zalantzarik gabe, baldintza horietan espero izatekoa baita zurgapena %20 jaitsiko dela.

Laser irteerako pultsuaren zabalera espektrala da beste ezaugarri nagusi bat. 4. irudian behatzen da ponpaketa energiaren menpeko zabalera hori (FWHM), bai esperimentalak bai teorikoa. Azken hau aztertzeko Jones-bektorea delako formalismoa erabili da [5]. Alegia, Jones matrizearen auto-balioak kalkulatu dira. Matrize horrek deskribatzen duen sisteman, Brewsteren angeluan kokatzen da xafla pasibo birrefringente bat, bere ardatz optikoa xaflaren gainazalaren paralelo. Beraz, honela definitzen da kalkulaturako transmitantzia: kristala n bider zeharkatu eta gero erresonadorean geratzen den fluxua; n kalkulatzeko, kontuan hartu dira erresonadorearen luzera eta



3. irudia. Laser igorpenaren maximoei dagozkien uhin-luzerak (λ_{\max}) zenbait energia erasotzailetarako (puntu urdinak). Menpekotasun ezlineala duten errefrakzio-indizeen ereduaren doiketaz lortutako balio teorikoak (erronbo gorriak)

4. irudia. Laser irteeraren zabalera esperimentalak (FWHM) zenbait energia erasotzailetarako (puntu urdinak) eta kalkulaturako balioak (puntu gorriak)

irteerako pultsuak ponpaketa-pultsuarekiko duen atzerapena. 4. irudiak erakusten duenez, bat datoz balio esperimentalak eta formalismo horretatik ateratzen diren emaitzak; ponpaketa-energia igotzen denean, laser-irteerako atzerapena laburragoa da eta beraz, laser moduen batezbesteko denbora ere hala da; hortaz iragazi espektral efektuak eraginkortasuna galtzen du. Horrek laser irteeraren zabalera espektrala (FWHM) handitu egiten du 0.5 nm-tik 2 nm-raino ponpaketa energia handienetarako.

ERREFERENTZIAK ETA ESTEKAK

- [1] D.R. PREUSS and J.L. GOLE, «Three-stage birefringent filter tuning smoothly over the visible region: theoretical treatment and experimental design,» *Appl. Opt.* 19, 702-710 (1980).
- [2] S. ZHU, «Birefringent filter with tilted optic axis for tuning dye lasers: theory and design,» *Appl. Opt.* 29, 410-415 (1990).
- [3] X. WANG and J. YAO, «Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters,» *Appl. Opt.* 31, 4505-4508 (1992).
- [4] ROBIN L. ZAGONE and WILLIAM M. HETHERINGTON III, «Four-plate birefringent filter for high-gain pulsed dye laser tuning,» *Appl. Opt.* 35, 624-628 (1996).
- [5] J. FERNÁNDEZ, I. IPARRAGUIRRE, I. ARAMBURU, A. ILLARRAMENDI, J. AZKARGORTA, M. VODA and R. BALDA, «K₅Nd(MoO₄)₄: A self-tunable laser crystal,» *Opt. Lett.* 28, 1341-1343 (2003).
- [6] W.R. RAPOPORT, C. P. KHATTAK, «Titanium sapphire laser characteristics,» *Appl. Opt.* 27, 2677-84 (1988).
- [7] Roditi Int. Corp. Ltd. UK emandako ezaugarri-orria
- [8] P. F. MOULTON, «Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃,» *J. Opt. Soc. Am. B* 3, 125-133 (1986).
- [9] S. HUARD, *Polarization of Light*, (John Wiley & Sons, New York, 1997).
- [10] A. YARIV and P. YEN, *Optical Waves in Crystals*, Wiley Series on Pure and Applied Optics (Wiley, New York, 1984).
- [11] M. BORN and E. WOLF, *Principles of Optics*, (Pergamon Press Sixth Edition, 1983).