

Polimerozko Zuntz Optiko Aktiboen Ikerkuntza, Laser eta Anplifikagailu Gisako Funtzionamendua Hobetzeko

Igor Ayesta Ereñok Jon Arrue eta Felipe Jiménezen zuzendaritzapean egindako tesiaren txostena, Euskal Herriko Unibertsitatean (UPV/EHU) Ingeniaritzan Doktore titulua eskuratzeko aurkeztua.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Bilbo, 2013ko uztaila

Polimerozko Zuntz Optiko Aktiboen Ikerkuntza, Laser eta Anplifikagailu Gisako Funtzionamendua Hobetzeko

Copyright © 2013 Igor Ayesta Ereño

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in Appendix C.

To receive a copy of this thesis in a transparent electronic form as defined by the GNU Free Documentation License, please mail to igor.ayesta@ehu.es

Laburpena

Polimerozko Zuntz Optiko Aktiboen Ikerkuntza, Laser
eta Anplifikagailu Gisako Funtzionamendua Hobetzeko

Igor Ayesta Ereño
Ingeniaritzan Doktorego-tesia
Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU,
Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa, Bilbo

Munduan zehar egindako ikerketa lanaren ondorioz lortutako aurrerapen nabarmengarriari esker, polimerozko zuntz optikoenganako interesa asko hasi da azkeneko bi hamarkadetan. Izan ere, telekomunikazioetarako erabiltzeaz gain, sentsore optikoak, laserrak, anplifikagailuak eta konmutadore optikoak eraikitzeke ere baliagarriak baitira.

Zuntz optiko aktiboen jakintza arloan aurrerapen aipagarriak egin diren arren, ikerketa lerro hau ikertzaileentzako erronka izaten jarraitzen du, oraindik ere oso ondo ulertzen ez diren esparruak baitaude.

Doktorego-tesi lan honek, dopaturiko polimerozko zuntz optikoen igorpen ezaugarrien analisi argia, eta orain arte ezezaguna izan dena, emateko desioan dauka jatorria. Alde batetik, zuntz optikozko laser eta anplifikagailuen analisi teoriko sakona erakutsiko dugu, interesgarriak diren parametro fisikoek igorpen ezaugarrietan daukaten eragina deskribatzeko asmotan. Bestalde, lau polimero konjokatu desberdinekin dopaturiko polimerozko zuntz optikoen ikerketa esperimentalak ere egin dugu, ezaugarri optikoak eta matrize ostalariaren eragina karakterizatzeko. Ikerketok oso erabilgarriak dira igorpen ezaugarriak hobeto ulertzeko, eta, ondorioz, polimerozko zuntz optikoekin eraikitako laser eta anplifikagailuen errendimendua hobetzeko.

Aita eta Amari,
berba hauek esker dezaketena
baino gehiago emateagatik.

Eskerrak

Atzera begira jarri eta urte hauetan lagundu nautenei eskertzeko unea iritsi zait, euren laguntzarik gabe hain urrun heldzea ezinezkoa izango litzaidakeelako.

Lehenik eta behin, tesi zuzendariak izan diren Jon Arrue eta Felipe Jiménezeri nire esker ona eman nahi diet, urte hauetan irakatsitako guztiagatik eta emandako laguntzagatik. Modu berean, Joseba Zubiarekin zorretan nago. Bere bizi-gogoagatik eta Fotonika Aplikatua ikerketa taldean (*Applied Photonics Group Bilbao*) lan egiteko atea irekitzeagatik. Ikerketa taldeko kide guztien laguntza ere eskertzea gustatuko litzaidake. Aipamen bereziarekin M.A. Illarramendi eskertu nahiko nuke, bere lanerako grinagatik eta baldintza gabeko laguntzagatik. Gainontzeko kideei ere nire eskerrik beroenak, Gotzon Aldabaldetrekere, Gaizka Durana, Amaia Berganza, Iñaki Bikandi, Eneko Arrospide, Andrea Blanco, Iker García, Begoña García eta Javier Gómez. Honez gain, ikerketa taldean lan egin duten ikasleei ere nire eskerrik zintzoenak. Bereziki, Xabier Azagirreren lan bikaina aipatu nahiko nuke.

Istituto Italiano di Tecnologia-ko (IIT) koordinatzailea, eta Politecnico di Milano unibertsitateko fisikako irakaslea den Guglielmo Lanzanirekin ere zorretan nago, 2011ko udan egin nuen hiru hilabetetako egonaldian erraztasun guztiak eskaintzeagatik. Modu berean, IIT-ko lantalde guztia ere eskertu nahiko nuke. Bereziki, Marcelo Alcocer, Cosimo D'Andrea eta Annamaria Petrozza. Denen artean IIT-ko beste kide bat bezala sentiarazi ninduten.

Koadrilaz ere ezin ahaztu. Txikiak ginenetik bizi izandako guztiagatik eta erakutsi didazuenagatik, nire besarkadarik beroenak zuentzako dira.

Azkenik, nire familiari eskerrik beroenak. Urte hauetan eskaini didazuen guztiagatik ez balitzateke izango, inoiz ez nintzateke hain urruti helduko. Eskerrik asko hor egoteagatik eta zaretena izateagatik.

Esker instituzionalak

Euskal Herriko Unibertsitateko (UPV/EHU) Euskara eta Eleaniztasuneko Errektoreordetza ere eskertu nahiko nuke tesi lan hau egiteko dirulaguntza emateagatik.

Gaien aurkibidea

Irudien Aurkibidea **ix**

Taulen aurkibidea **xvii**

1 Sarrera	1
1.1 Polimerozko Zuntz Optikoen Bilakaera Historikoa	2
1.2 PZOen Egiturak eta Materialak	7
1.3 PZOen Sailkapena	8
1.3.1 Maila-indizeko PZOak	8
1.3.2 Indize Gradualeko PZOak	9
1.3.3 Multimaila-Indizeko PZOak	10
1.3.4 Nukleo Anitzeko PZOak	10
1.3.5 Mikroegituratutako PZOak	11
1.4 Atenuazioa	11
1.5 PZO Aktiboak	13
1.5.1 PZOzko Anplifikagailuak	13
1.5.2 PZOzko Laserrak	15
1.6 PZOen Aplikazioak	19
1.6.1 Sare Lokalak (LAN)	19
1.6.2 Automozio-aplikazioak	20
1.6.3 PZOetan Oinarrituriko Sentsoreak	20
1.6.4 PZOetan Oinarrituriko Laser eta Anplifikaiguak	21
1.7 Tesiaren Testuingurua eta Helburuak	22
1.8 Erreferentziak	24
2 Dopaturiko PZOak: Oinarri Teorikoa	31
2.1 Erdieroale Organikoak eta Polimero Konjokatuak	32
2.2 Xurgapen Lineala	35
2.3 Igorpena	38
2.3.1 Berezko Igorpena	40
2.3.2 Igorpen Estimulatua	42
2.3.3 Berezko Igorpen Anplifikatua	43
2.4 Seinale-irabazia	45
2.5 Fotoegonkortasuna	47

2.6	Ondorioak.....	48
2.7	Erreferentziak.....	50
3	Sistema-eredua	53
3.1	Artearen Egoera eta Helburu Orokorrak.....	54
3.2	Tasa-ekuazioak.....	55
3.3	Teknika Numerikoak eta Inplementazio-xehetasunak.....	64
3.3.1	Egonkortasuna, Zehaztasuna eta Konputazio-Kostuei Buruzko Erronkak.....	66
3.3.2	Emandako Konponbideak.....	66
3.3.3	Hasierako eta Mugalde-baldintzak.....	68
3.4	Ondorioak.....	69
3.5	Erreferentziak.....	71
4	Emaitza Konputazionalak	75
4.1	Maila-indizeko PZOzko Laserretan Zeharreko Igorpen Espektralaren Desplazamenduak eta Zabalera Espektralaren Aldaketak.....	76
4.2	Malda-efizientzia eta Ataria MI eta IGko PZOzko Laserretan.....	84
4.2.1	Zenbakizko Irekiduraren Eragina.....	84
4.2.2	Ponpaketa-Ezaugarrien Eragina.....	88
4.3	MI eta IG PZOzko Anplifikagailuen Seinale-irabazia.....	97
4.4	Ondorioak.....	104
4.5	Erreferentziak.....	106
5	Karakterizazio Esperimentala	109
5.1	Esperimentua.....	110
5.2	Emaitzak eta Eztabaida.....	113
5.2.1	Analisi Espektroskopikoa.....	113
5.2.2	Propagazio Distantziaren Eragina Igorpeneko Espektroan.....	115
5.2.3	Fotoegonkortasuna.....	119
5.2.4	Dopanteen Distribuzioa PMMA Matrizean.....	124
5.3	Ondorioak.....	126
5.4	Erreferentziak.....	128
6	Ondorioak	131
6.1	Tesi-lan Honen Ekarpenak.....	131
6.1.1	Garaturiko Sistema-eredua.....	131
6.1.2	PZOzko Laser eta Anplifikagailuen Ikerketa Teorikotik Ateratako Ondorioak.....	132

6.1.3	PZO Dopatuen Karakterizazio Esperimentaletatik Ateratako Ondorioak	132
6.2	Emaitzen Plazaratzea	133
6.2.1	Nazioarteko Aldizkarietan Publikatua	133
6.2.2	Nazioarteko Kongresu-txostenetan Publikatuak	134
6.2.3	Estatuko Kongresu-txostenetan Publikatuak	135
6.2.4	Erlazionaturiko Publikazioak	135
6.2.5	Prozesuan dauden Artikuluak	136
6.3	Etorkizuneko Ikerketa-lana	136
6.4	Erreferentziak	138
A	Techniques for Measuring the Attenuation Coefficient	139
A.1	Optical Time-Domain Reflectometer	139
A.2	Cutback Technique	140
A.3	Side-Illuminated Fluorescence	141
A.4	References	144
B	Calculation of the Parameters β and γ	145
B.1	References	149
C	GNU Free Documentation License	151
C.0	Preamble	151
C.1	Applicability and Definitions	152
C.2	Verbatim Copying	154
C.3	Copying in Quantity	154
C.4	Modifications	155
C.5	Combining Documents	157
C.6	Collections of Documents	157
C.7	Aggregation with Independent Works	158
C.8	Translation	158
C.9	Termination	158
C.10	Future Revisions of this License	159
C.11	Relicensing	159
	ADDENDUM: How to use this License for your documents	160

Irudien Aurkibidea

1.1 irudia:	Atenuazioaren eboluzio historikoa MI PZOetan (zirkuluak) eta IG PZOetan (karratuak).....	4
1.2 irudia:	PZO baten egitura.....	7
1.3 irudia:	Maila-indizeko (ezkerra) eta indize gradualeko (eskuma) PZOen gurutze-sekzioak eta errefrakzio indizearen profilak.....	8
1.4 irudia:	Errefrakzio indizean araberrako PZOen hiru talde nagusiak. (a) MI, (b) IG eta (c) MAI.....	8
1.5 irudia:	Argiaren hedapena MI eta IG PZOetan.....	9
1.6 irudia:	Nukleo anitzezko PZOen hiru antolaketa posible desberdin [34].....	11
1.7 irudia:	MPZO baten irudia. Mikroegitura zonaldearen itxura hexagonala behe-ezkerraldeko zoomean beha daiteke.....	11
1.8 irudia:	PMMA eta PS PZOen transmisio galeren espektroa [38].....	13
1.9 irudia:	Fotoi-bateko (ezkerreko partean) eta fotoi-biko (eskumako partean) xurgapen prozesuak dopante molekulen ohiko energia diagraman. Xurgapen eta emisio prozesuak gezi-solidoaren eta gezi-marratuaren bitartez irudikatu dira, hurrenez hurren.	17
1.10 irudia:	PZOen mundu-mailako merkatuaren eboluzio estimatua.....	19
1.11 irudia:	(Goian) Laser-diodo eta zuntzaren arteko akoplamendua. (Behean) PZOzko laser eta zuntzaren arteko akoplamendua.....	21
1.12 irudia:	Dopante desberdinen banakako irabazien teilakatzeak irabazikurba zabalagoa izatea ahalbidetzen du. Puntu-lerro bertikalak WDM kanalen posizioak dira.	22
2.1 irudia:	Eteno-molekularen (C_2H_4) egitura kimikoa.....	33
2.2 irudia:	Bi p orbitalen ($2p_x$ eta $2p_y$) eta 2s orbitalaren arteko hibridaziotik, hiru sp^2 orbital lortzen dira. $2p_z$ orbitalak ez du aldaketarik jasotzen.	34
2.3 irudia:	Lotura simple eta bikoitzak tartekatzen dituen transpoliazetileno egitura.....	34
2.4 irudia:	Erdieroale organiko ohiko baten Jablonsky diagrama sinplifikatua.	35
2.5 irudia:	PZO lagin baten xurgapen optikoa.....	36
2.6 irudia:	Dopante molekula bakoitzak bere xurgapen gurutze-sekzioaren berdina den azalerako argia xurgatzen du.....	37

2.7 irudia:	Fotoi baten xurgapena. (a) Elektroia oinarritzko egoeran. (b) Elektroia kitzikaturiko egoerara sustatua fotoi erasotzaile baten energiaren bitartez. (c) Elektroia ez-erradiaziozko desintegrazio oso bizkorra.....	38
2.8 irudia:	Dopante organikoen ohiko denbora eskalak.....	39
2.9 irudia:	Errodamina B-ren xurgapeneko (lerro solidoa) eta igorpeneko (lerro marratua) gurutze-sekzioen espektroak PMMA materialean [16].	40
2.10 irudia:	Fotoi baten berezko igorpena. a) Elektroia S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean. b) Erradiaziozko berezko desintegrazioa oinarritzko egoerara. c) Elektroia oinarritzko egoeran, fotoi bat igorri ostean.	41
2.11 irudia:	Berezko igorpenaren ondoriozko S_2 bibrazio azpi-mailako populazioaren eboluzio esponontzial beherakorra τ erdibitzarekiko.	41
2.12 irudia:	Fotoi baten igorpen estimulatua. a) Elektroia bat S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean. b) Fotoi erasotzaile batek bigarren fotoi baten igorpena estimulatzen du, lehenengo fotoiaren fasean eta energia berarekin. c) Estimulaturiko fotoia oinarritzko egoeran dago, fotoi originalaren anplifikazio koherentea gertatu delarik.	42
2.13 irudia:	Zabalera espektralaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe (goian). Irteerako energiaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe (behean). Kurba honetatik ASE-ren ataria eta malda efizientzia kalkula daitezke. Irudi biak [25] erreferentziatik lortu dira.....	44
2.14 irudia:	Seinale-irabazia optikoki ponpaturiko PZO lagin batean.	45
2.15 irudia:	Ponpaketa energia, seinale-energia handitzeko erabiltzeaz gain, beroan eta fluoreszentsian ere bilakatzen da.	46
3.1 irudia:	PZOzko anplifikagailuen (goian) eta laserren (behean) kitzikapena.....	56
3.2 irudia:	Argiaren hedapenaren eskema z noranzkoan, eta luzetara kitzikaturiko PZO aktiboen zeharreko argi-potentziaren $P(t,z,\lambda)$ kalkulurako koordinatuen jatorria.	56
3.3 irudia:	Dopante organiko eta polimero konjokatuen xurgapen eta igorpen prozesuen erantzuleak diren energia mailak.	57
3.4 irudia:	Eredu konputazionala azaltzeko fluxu-diagrama sinplea.	65
3.5 irudia:	Aldagaien biltegitratzea ordenagailu-memorian.....	67
4.1 irudia:	(a) Errodamina B eta (b) PFO-ren xurgapen (lerro solidoa) eta igorpen (lerro marratua) espektroak PMMA materialean.....	78

-
- 4.2 irudia: Uhin-luzera maximoaren eboluzioa (guk kalkulaturikoa) zuntzaren luzeraren menpe (atariaren azpitik). (a) Errodamina B-rekin dopaturiko zuntza ponpaketa-energia dentsitatea $8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ denean (dopantearen kontzentrazioa legendan). (b) PFO-rekin dopaturiko zuntza ponpaketa-energia dentsitatea $0.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ denean (dopantearen kontzentrazioa legendan). 79
- 4.3 irudia: Fluoreszentzia espektoak konputazionalki (lerro-solido mardulak) eta esperimentalki [1] (marra-lerro meheak) lortuak hiru propagazio distantziatarako z : 1.15 cm (markatzaile karratuak), 3.15 cm (markatzaile triangeluarrak) eta 5.15 cm (markatzaile gabekoak). Kontzentrazioa 0.001 mol% da..... 80
- 4.4 irudia: Zabalera espektralaren (FWHM) eboluzioa distantziarekiko (a) PFO (konputazionala eta esperimental) eta (b) Errodamina B-ren kasuetan. Ponpaketa-energiak atariaren azpitik daude: $0.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ PFO-ren kasuan eta $8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ Errodamina B-ren kasuan. Dopante bakoitzaren kontzentrazioa: legendan. 81
- 4.5 irudia: Bi kontzentrazio desberdinetarako (a) batez besteko uhin-luzeraren eta (b) FWHM-ren eboluzioak distantziarekiko. 83
- 4.6 irudia: Malda-efizientzia hurbilketa-kurba zuzenaren malda bezala definitzen da eta ASE-ataria hurbilketa-kurbaren ardatz horizontalarekiko ebakidura bezala definitzen da. 84
- 4.7 irudia: Zuntza energia desberdinekin kitzikatzean 581 nm-ko irteerako energiaren eboluzioa, zenbakizko irekiduraren balio desberdinentzako. (a) MI eta (b) IG PZOak $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak. 85
- 4.8 irudia: ASE-ataria 581 nm-tan zuntzaren ardatzeko zenbakizko irekiduraren menpe. MI (zirkulu-markatzaileak) eta IG (gurutze-markatzaileak) PZOetan, $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak. Lerro marratuek $Thr = c_1 \cdot NA_0^2 + c_2$ adierazpena betetzen dute, MI PZOen kasuan $c_1 = -1.18$ eta $c_2 = 29.8$ eta IG PZOen kasuan $c_1 = -6.91$ eta $c_2 = 34.6$ 86
- 4.9 irudia: Malda-efizientzia (η) 581 nm-tan zuntzaren ardatzeko zenbakizko irekiduraren menpe, MI (zirkulu-markatzaileak) eta IG (gurutze-markatzaileak) PZOetan $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak. Lerro marratuek $\eta = c_1 NA_0^2$ adierazpena betetzen dute, MI PZOen kasuan $c_1 = 0.031$ eta IG PZOen kasuan $c_1 = 0.2$ izanik..... 88
- 4.10 irudia: (a) Ponpaketa atari-energia eta (b) malda-efizientziaren eboluzioa $\sigma_{t,pump}$ parametroaren menpe. 89

-
- 4.11 irudia: (a) FWHM tenporalaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. FWHM minimoa τ -ren parekoa da. (b) Igorpeneko maximoen denboren (zuntzaren irteerako denbora maximo normalizatuak) eboluzioa ponpaketa energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. 0.17 m-ko MI PZOa. 90
- 4.12 irudia: (a) FWHM espektralaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. (b) Uhin-luzera maximoaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. 0.3 m-ko MI PZOa. . 91
- 4.13 irudia: PMMA materialean txertaturiko Errodamina 6Gren (a) xurgapeneko eta igorpeneko espektroak. (b) FWHM espektralaren eta (c) uhin-luzera maximoaren eboluzioak ponpaketa-energiaren menpe [21] artikuluko simulazio parametro berdinak erabilia. 92
- 4.14 irudia: (a) Atari-energiak ponpaketa pultsuaren zabaleraren menpe, luzera desberdinetako IG zuntzetan. (b) Aurreko kasuan erabilitako pultsu-zabalera tartean lorturiko igorpen-efizientziak (lerro solidoak). Irudikaturiko bi marra-lerroek IG zuntzekin alderaturik, MI zuntzek efizientzia baxuagoa erakusten dute (*' 0.17 m eta '◇' 0.1 m). 96
- 4.15 irudia: (a) Linealki irudikaturiko atari-energiaren eboluzioa ponpaketa pultsu-zabalerarekiko, IG zuntzen kasuan (lerro solidoa) eta MI zuntzen kasuan (marra-lerroa). (b) Pultsu-zabalerarekiko sentsibilitatea eta atari-energia minimoaren arteko erlazioa. 97
- 4.16 irudia: (a) Normalizaturiko potentzia espektralaren distribuzioa zenbakizko irekiduraren balio desberdinetarako, MI eta IG PZOetan. (b) Seinale-irabazia NA_0 -ren menpe, MI eta IG PZOetan. 4.I Taulako parametroak. 98
- 4.17 irudia: Seinale-irabaziaren eboluzioa 591 nm-tan zuntzaren luzeraren menpe, IG zuntzetan. Dopante molekulen dentsitatea (a) 0.13 ppm eta (b) 1 ppm da. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1.43$ eta $NA_0 = 0.51$ 99
- 4.18 irudia: MI motako zuntzetan seinale-irabaziaren eboluzioa 591 nm-tan zuntzaren luzeraren menpe, bi kontzentrazio desberdin kontutuan harturik. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1$ eta $NA_0 = 0.51$ 100
- 4.19 irudia: Seinale-irabaziaren emaitza esperimentalen [12] (biribilak) eta gure emaitza konputazionalen arteko konparaketa 591 nm-ko

	uhin-luzeran, ponpaketa-energia desberdinak kontutan harturik. Zuntzaren luzera 1 m da. 4.I Taulako parametroak....	100
4.20 irudia:	Seinale-irabaziaren aldaketak ponpaketa energiaren menpe, γ parametroaren hiru balio desberdinentzako. $\lambda = 591$ nm-ko uhin-luzeran eta $NA_0 = 0.51$. 4.I Taulako parametroak.....	101
4.21 irudia:	(a) Seinale-irabazia sarrerako seinaleren uhin-luzeraren menpe, zuntzaren luzera desberdinetarako. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulakoak dira, $\gamma = 1.43$ delarik. (b) 3 dimentsiotako irudiak, seinalearen uhin-luzerak (nm-tan) eta zuntzaren luzerak (cm-tan), seinale-irabazian duen eragina erakusten du.....	102
4.22 irudia:	Seinale-irabazia sarrerako seinalearen uhin-luzeraren λ_s (nm-tan) menpe, esperimentalki lorturiko hiru gainjarpen-faktore desberdinentzako. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulako berdinak dira.....	103
4.23 irudia:	Irabazi totala (lerro solidoa) eta seinale-irabazia (marra-lerroa) seinale-potentziaren menpe 591 nm-tan. Irabazi totalarekiko diferentzia irudiaren beheko aldean ikus daiteke, puntu-lerroaren bitartez irudikaturik. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulako berdinak dira.	103
4.24 irudia:	Irteerako FWHM tenporalaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1.43$ eta $NA_0 = 0.51$	104
4.25 irudia:	Seinale-irabaziaren eboluzioa seinale-uhin-luzeraren menpe, ponpaketa-potentziaren bi balio desberdinentzako ($P_{p1} = 5$ kW, $P_{p2} = 2$ kW) eta NA_0 -ren bi balio desberdinentzako ($NA_{01} = 1$, $NA_{02} = 0.51$). $\gamma = 1.43$. 4.I Taulako parametroak.	104
5.1 irudia:	PZOzko laginetan txertaturiko lau polimero konjokatuen egitura molekularra.....	111
5.2 irudia:	Dopaturiko PZOen igorpen espektroak neurtzeko erabilitako konfigurazio esperimentalak. ATT: Atenuadore aldakorra; SHG: Inspire Blue bigarren harmoniko sortzailea, BS: argi-sorta banatzailea; PD: fotodetekttagailua; MM: multimetra; LS: motor lineala; xy POS: xy microposizionatzaileak; OS: espektrometro optikoa.	111
5.3 irudia:	PFO, F8BT, F8T2 eta PF3T dopanteekin dopaturiko PZOen xurgapeneko (lerro solidoa) eta igorpeneko (marra-lerroa) espektroak. Igorpen-espektroa lortzeko lagin bakoitza bere xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikatu da, 16 cm-ko zuntz-luzeran.	113

-
- 5.4 irudia: PFO, F8BT, F8T2 eta PF3T dopanteekin dopaturiko PZOen W_1 -en eboluzioa kitzikapen uhin-luzeraren menpe. Kasu guztietan kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta argiaren propagazio distantzia 16 cm. 115
- 5.5 irudia: PFO (o), F8BT (V), F8T2 (*) eta PF3T (+) dopanteekin dopaturiko PZOen $W_2^{1/2}$ -en eboluzioa kitzikapen uhin-luzeraren menpe. Kasu guztietan kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta argiaren propagazio distantzia 16 cm. 115
- 5.6 irudia: PF3T-rekin dopaturiko zuntzaren igorpeneko espektroaren eboluzioa argi-propagazio distantziarekiko, kitzikapen uhin-luzera 440 nm eta irradianzia 0.97 Wcm^{-2} den kasu konkreturako..... 116
- 5.7 irudia: Xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikaturiko zuntzen lehenengo momentuaren eboluzioa propagazio distantziaren menpe. Kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} . Detektoretik hurbilen zegoen zuntzaren puntua, zerora normalizatu da. Doiketa linealak puntu-lerroen bitartez egin dira..... 117
- 5.8 irudia: Igorpeneko uhin-luzera desberdinetan z -ren menpeko transmitituriko intentsitatearen eboluzioa. Kitzikapena: uhin-luzera dopante bakoitzaren xurgapeneko maximoan eta 0.97 Wcm^{-2} irradianziarekin. Marra- eta puntu-lerroak (5.3) ekuazioa doitzen lortu dira, $R^2 = 0.9491$ (407 nm-tan) eta $R^2 = 0.5313$ (430 nm-tan) PFO laginean, $R^2 = 0.9937$ (495 nm-tan) eta $R^2 = 0.6919$ (545 nm-tan) F8BT laginean, $R^2 = 0.9906$ (477 nm-tan) eta $R^2 = 0.7739$ (530 nm-tan) F8T2 laginean, eta $R^2 = 0.9920$ (530 nm-tan) eta $R^2 = 0.8175$ (605 nm-tan) PF3T laginean izanik. 118
- 5.9 irudia: Dopaturiko lau zuntzen atenuazio-koefiziente linealak. Kasu bakoitzean kitzikapen uhin-luzera xurgapeneko maximoan kokatu da eta kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da. 119
- 5.10 irudia: (a) F8BT luginaren esposizio desberdinetarako igorpen espektroak, zuntza bere xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikatuz 0.97 Wcm^{-2} irradianziarekin. Zuntzaren luzera 16 cm izan da. (b) Igorpen espektroen desberdintasunak 24 orduko atsedenaldiaren aurretik eta ondoren. 120
- 5.11 irudia: Fluoreszentzia: (a) eta (b), lehenengo momentua: (c) eta (d), eta bigarren momentuaren erro karratua: (e) eta (f), kitzikapen denboraren menpe. Kasu bakoitzean kitzikapen uhin-luzera xurgapen maximoan kokatu da, kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta zuntzaren luzera 16 cm. 60 minututan

	zehir zuntzak kitzikaturik: (a), (c) eta (e). Atsedendialdiaren ostean zuntzak birkitzikaturik: (b), (d) eta (f). PFO (o); F8BT (∇); F8T2 (*); PF3T (+).....	121
5.12 irudia:	PFO eta PF3T laginen fluoreszentzia kapazitatearen eboluzioa kitzikapen denboraren funtzio. Irradiantzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta zuntzaren luzera 16 cm. Hiru uhin-luzera desberdinak: o: 380nm, +: 390nm eta ·: 415nm PFO laginean eta o: 420nm, +: 440nm eta ·: 480nm PF3T laginean.....	123
5.13 irudia:	F8BT laginaren lehenengo momentuaren (a) eta bigarren momentuaren erro karratuaren (b) eboluzioak kitzikatzen denborarekiko, xurgapen maximoko uhin-luzeran eta lau irradiantzia desberdinekin kitzikatuz. Zuntzaren luzera: 16 cm. (c) Kitzikapen irradiantziarekiko momentu bien menpekotasuna 500. segundoan.....	123
5.14 irudia:	Lau dopaturiko PZOen TEM irudiak. Polimero konjokatuak: beltz kolorea. PMMA: gris-argi kolorea.....	125
5.15 irudia:	Lau dopaturiko PZOen AFM irudiak. Irudi guztien azalera $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ da. Polimero konjokatuak: kolore argian. PMMA: marroi kolorea.....	126
Fig. A.1:	The optical time domain reflectometer (OTDR) uses the time dependence of reflected light to analyze fibre losses.....	139
Fig. A.2:	The optical loss in a POF sample (top); and the loss in the same fibre when it is cut (bottom).	141
Fig. A.3:	Side-illuminated fluorescence set-up. The light is collected with a spectrometer after it has travelled a distance z through the POF sample.....	142
Fig. A.4:	Side-illuminated fluorescence light that (top) travels along the fibre axes and (bottom) is a point source.....	142
Fig. B.1:	Representation of the solid angle of the guided emitted rays in a fibre.	146
Fig. B.2:	β (average value) obtained from equation (B.3) for a typical GI POF, in which $\theta(r)$ and $\beta_i(r)$ decrease with r as shown in the solid and dashed curves.....	147
Fig. B.3:	Normalized dye density and power density distributions $\theta(r)$ and $\psi(r)$, respectively, obtained from [2]......	147

Taulen aurkibidea

1 I Taula:	PZOen transmisio kapazitatearen eboluzio historikoa.....	5
1 II Taula:	Azken 40 urteetan PZOekin erlazionaturiko mugarri garrantzitsuenen eboluzio historikoa.	6
1 III Taula:	PMMAz eta PFz eginiko IG PZOen ezaugarri nagusien laburpena	10
1 IV Taula:	Dopante desberdinekin dopaturiko PZOzko anplifikagailuetan esperimentalki lorturiko irabazien ezaugarriak.....	14
1 V Taula:	Dopante organiko desberdinekin dopaturiko PZOzko laserren esperimentalki lorturiko igorpen ezaugarriak.....	18
3 I Taula:	Maila-indize (MI) eta indize gradualeko (IG) PZOen β eta γ parametroen espresio eta balio ohikoak. Informazio gehiago nahi izanez gero jo tesiaren B eranskinera.....	64
4 I Taula:	Errodamina B-rekin dopaturiko maila-indize eta indize gradualeko PZOzko laser eta anplifikagailuak simulatzeko erabiiltako parametroak.....	82
5 I Taula:	Polimero konjokatuekin dopaturiko PZOen xurgapen eta igorpen ezaugarriak.....	113
5 II Taula:	Dopaturiko zuntz bakoitzarentzako lehenengo momentuaren eboluzioaren malda, mugatze-koefizientea, eta xurgapeneko eta igorpeneko espektroen arteko gainjarpena, argi-propagazioaren funtzio.....	117
5 III Taula:	5.11(a) irudiko datu esperimentalen eta (5.4) ekuazioaren arteko doiketarik lorturiko balioak.	122

1. Kapituluia

Sarrera

Laburpena— Lehenengo kapituluia, tesi hau kokatzen den testuinguruaren sarrera bat da, lan honen helburu nagusiak aurkezten direlarik. Lehenik eta behin, polimerozko zuntz optikoen (PZO) ezaugarri nagusiak, euren eboluzio historikoa eta zuntz mota hauetatik zehar argiaren hedapen ezaugarriak azaltzen dira. Honen ostean, PZOen nukleoa dopante fluoreszenteekin dopatzean lor daitezkeen igorpen ezaugarri bereziak azaltzen dira. Azkenik, behin testuingurua argi geratu denean, tesi lan honen helburu desberdinak zerrendatuko dira.

20. mendean zehar elektronikaren industrian jasotako aurrerapen nabarmenek, ordura arteko giza bizimodua guztiz irauli zuten. Huts-hodia izan zen mendearen lehenengo erdian elektronikaren garapena ahalbidetu zuen elementua. Informazioaren transmisioa distantzia luzeetan egitea lortu zen irrati eta telebista bitartez eta, radarra, konputagailu elektronikoa, telefono sarea, industria kontrola, etab. bezalako aplikazioak garatzea lortu zen. Aplikazio hauetariko batzuk huts-hodiak baino lehenagokoak ziren arren, hazkunde esanguratsua jasan zuten huts-hodiaren garapenaren ondorioz. Ordutik aurrera, ikertzaileak txikiagoak eta bizkorragoak diren osagaien bila hasi ziren: transistore eta elementu diskretuen bitartez hasieran, eta milioika transistorez osaturiko zirkuitu integratuen bitartez ondoren. Izan ere, mota desberdinetako osagaiak integratzeko gaitasunak alde batetik, eta teknika berrietan egindako aurrera pausok bestetik, gaur egun hain ezagunak ditugun aparatuak garatzea ahalbidetu dute, hala nola, smartphonak, tabletak, kamera digitalak, etab.

Gaur egun, ordea, fotoietan oinarritutako industria iraultza berria bizi-tzen ari gara. Fotonika industrialean argia erabiltzen da informazioa transmi-

titu eta prozesatzeko, baita materialak fisikoki eraldatzeko ere. Zuntz optikoe-kin eraturiko komunikazio-sareak dira aplikazio garrantzitsuenetako bat, non informazioaren transmisioa argiaren bitartez egiten den. Hala eta guztiz ere, distantzia luzeetarako zuntz optikoen erabilera ez zen 1966. urtera arte kontsideratu, Kao eta Hockham-ek errefrakzio indize txikiagoz estalduriko zuntz dielektrikoak informazioa gida zezakeela proposatu zuten arte [1]. Proposamen honen bideragarritasuna, transmisio galerak 20 dB/km baino baxuagoak izatearen menpekota izango litzateke. Garai haietan argiaren atenuazioa beiran 1000 dB/km baino handiagoa izan arren, 20 dB/km mailatik beheragoko bali-oak lortzeko inolako eragozpen fisikorik ez zegoela demostratu zuten. Lan honen eta ordutik aurrera egindako lanen ondorioz, 2009. urtean C.K. Kao fisikako Nobel sariarekin saritua izan zen. Beirazko zuntz optikoen (BZO) transmisio galerak etengabe jaitsi dira ordutik, gaur eguneko 0.151 dB/km-ko bali-ora heldu arte [2].

1960ko hamarkadan, hainbat ikertzaile zuntz optikoak garatzeko material berrien bila lanean zebiltzala, zuntz mota berri bat garatzea lortu zuten, polimerozko zuntz optikoa (PZO), hain zuzen ere. Polimeroa, beira baino merkeagoa eta maneikorragoa den arren, lehenengoz garaturiko polimetilmetakrilatozko (PMMA) maila-indizeko polimerozko zuntz optikoen (MI PZO) atenuazioa altuegia zen telekomunikazioetan erabiltzeko (500 dB/km 650 nm-ko uhin-luzeran). Hala ere, Keio Unibertsitateko Koike irakasleak indize gradualeko polimerozko zuntz optikoak (IG PZO) garatu zituenetik [3]-[5], eta batez ere, polimero amorfo perfluorinatuen erabileraren bitartez atenuazioaren ezau-garriak hobetzea lortu zirenetik [6], PZOak oso erakargarriak bilakatu ziren kapazitate handiko transmisio sistema bezala erabiltzeko [7].

Beste alde batetik, datu transmisioetarako elementu pasibo bezala erabiltzeko aproposak izateaz gain, PZOen nukleoko materiala dopante fluoreszenteekin dopa daiteke, sentsoreak, laser-, amplifikagailu- eta konmutadore-optikoak garatzeko aproposak izanik.

Hau guztia osatzeko, hurrengo lerroen helburua PZOen mugarri historikoen analisisia egitea izango da. Sarrera honen bitartez, irakurleak artearen egoera eta hurrengo kapituluaren edukia hobeto ulertzea espero da.

1.1 Polimerozko Zuntz Optikoen Bilakaera Historikoa

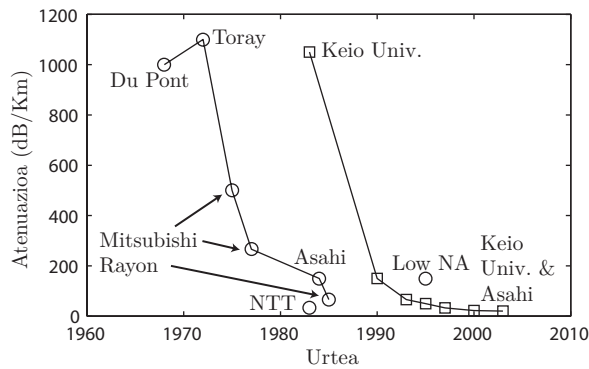
Argiaren bitartez telekomunikazioetarako aplikazioak garatzeko lehen ideiak aurkitzeko 19. menderaino atzera begiratu beharko genuke. 1880an telefonoa asmatu zuen Alexander Graham Bellek lehenengo fotofonoa ere garatu

zuen. Gailu honen bitartez informazioa aire bidez transmititu zitekeen, modulatoriko eguzki izpien bitartez. Fotofonoa ondo diseinaturiko tresna izan arren, telefonoa baino praktikotasun gutxiago zuen, eta, ondorioz, ez zen askoz gehiagorik garatu. Edonola ere, Bellek garai hartan behaturiko oinarritzko printzipio asko oso erabilgarriak izan dira gaur egungo telekomunikazio sistemak eraiki eta diseinatzeko.

Ordutik hona, komunikazio optikozko sistemek garapen jarraia izan dute eta informazioa garraiatzeko kapazitateak sekulako igoera jaso du. Hain zuzen ere, datu-tasa altuko komunikazioen eskaria, kontsumitzaileen premisetan eta negozio guneetan, oso bizkor hazten ari da. Eskariaren hazkuntza hau mota desberdinetako aplikazioen erabilera zabalaren ondorioa da, adibidez, abiadura handiko internet sarrerak, definizio altuko komunikazioa sistemak, etab. Honen harira, PZOetan oinarritutako komunikazio sistemak dira etorkizunik onena aurkezten dutenak, batez ere azken 100 metroetarako. Hau justifikatzeko, aipa daitezke alde batetik, zuntz optikoak dituen berezko abantailak (banda-zabalera altua, atenuazio baxua eta immunitate elektromagnetikoa), eta beste alde batetik, PZOak manipulatzeko erraztasunak [8],[9].

1966an Dupont konpainiak lehendabiziko MI PZO sortu zuen, PMMAz egindako nukleoarekin eta partzialki perfluorinatutako estaldurarekin. Edonola ere, MI PZOak ez ziren 1975. urte-arte komertzializatu, Dupont konpainiak produktu eta patente guztiak Japoniako Mitsubishi Rayon konpainiari saldu zizkion arte. Eska izenarekin komertzializatu zen produktua. Hurrengo urteetan beste bi konpainia gehitu ziren PZOen merkatura, Asahi Chemical eta Toray enpresak, hain zuzen ere. PZOen merkatu globala hiru enpresen artean kontrolatzen bazuten ere, zuntzek eskaintzen zuten atenuazio-optikoa altuegia zen oraindik. Ideia bat egiteko, Dupont enpresak negozioa saldu zuenean PMMA PZOen galerak 1000 dB/km-koak ziren.

1980ko hamarkadan, hainbat ikerketa egin ziren PZOen atenuazio altuegiak gutxitzeko asmoarekin. 1983. urtean, Kaino *et al.* ikertzaileek atenuazio baxuko MI PZOak lor zitezkeela demostratu zuten, deuteraturiko PMMA erabilia [10]. Bitartean, Groh *et al.* ikertzaileek PMMA oinarrituriko PZOen atenuazioaren limite teorikoa kalkulatu zuten [11]. Emaiza hauen publikazioak arestian aipaturiko hiru konpainien arteko lehia sortu zuen, 1980ko hamarkadaren bukaerarako limite teorikoaren inguruko atenuaziodun PZOak eskura zitezkeelarik. Adibidez, Mitsubishi Rayon konpainiak PMMAz eginiko MI PZOren galerak 150 dB/km-ko baliora murriztu zituen 650 nm-ko uhinluzeran, 100 m-ko distantzian 50 Mb/s-ko banda-zabalerarekin. Atenuazio balioen eboluzio historikoa 1.1 irudian ikus daiteke, bai maila-indizeko, eta baita indize gradualeko zuntzena ere.



1.1 irudia: Atenuazioaren eboluzio historikoa MI PZOetan (zirkuluak) eta IG PZOetan (karratuak).

IG PZOei dagokienez, Keio Unibertsitateko Koike irakasleak garatu zituen lehendabizikoz 1982. urtean, 1070 dB/km-ko galerekin 670 nm-ko uhinluzeran [3]-[5]. Hasierako atenuazio-balioak altuak ziren arren, fabrikazio prozesuen optimizazioaren bitartez, eta, batez ere, hidrogeno loturak fluor loturekin ordezkatzearen ondorioz, atenuazio-balio baxuagoetara heltzea lortu zen (≈ 150 dB/km). 1996. urtean, Japoniako Asahi Glass eta Keio Unibertsitatearen arteko elkar lanaren ondorioz, lehendabiziko IG PZO perfluorinatuak (PF) garatu ziren, ohiko PMMA PZOen atenuazioaren herenarekin, hots, 50 dB/km 650-1300 nm tartean. Zuntz hauek egiteko materiala CYTOP[®] izenarekin eza gutzen da. 2000. urteko ekainean, Asahi Glass enpresak Lucina dibisia sortu zuen, transmisio-kapazitate handiko zuntz mota hau merkaturatzeko asmoarekin [12]. 1 I Taulan ikus daitekeen bezala, kapazitatearen bilakaera gorakorra izan da lehenengoko zuntz haieratik hona.

PZOen transmisio abiaduraren, banda-zabaleraren edota bit-emariaren ezaugarriak dagokienez, azkeneko hamarkadetan hobekuntza nabaria gertatu da. Adibidez, 1992. urtean Koike *et al.* 100 m-ko distantzian 5 GHz-ko banda-zabalera izatea lortu zuten IG PZOen bitartez [13]. 1994. urtean 100 m-ko distantzian 2.5 Gb/s-ko transmisio abiadura demostratu zen IG PZO erabilita [14]. 1999. urtean, ordea, IG PZO PF-arekin 11 Gb/s-tara heldu zen, hau da, modu-anitzeko beirazko zuntzaren abiadura-marka hautsi zen [15]. Ondoz ondoko aurrerapenei esker, urtebete beranduago, 1 km-ko distantzian 1 Gb/s-ko transmisio abiadura lortu zen [16]. Azkenik, 2010. urtean IG PZO PF eta modulazio teknika konplexuen bitartez, 100-ko distantzian 47.4 Gb/s-ko marka haustea lortu zen [17]. Emaitza hauetan PZOetan oinarrituriko teknologia aproposa dela ikus daiteke, sare lokalen aplikazioetarako, sarrera sareetarako, etab. Azken 40 urteetako PZOen mugarri garrantzitsuenen laburpena 1 II Taulan ikus daiteke.

1 I TAULA: PZOEN TRANSMISIO KAPAZITATEAREN EBOLUZIO HISTORIKOA.

Bit-abiadura (Gbps)	Distantzia (m)	λ (nm)	Afiliazioa
0,531	100	650	Essex Unib.
1	30	670	IBM, Keio Unib.
2,5	100	650	Keio Unib., NEC
2,5	200	1300	Keio Unib., Asashi G., Fujitsu
2,5	200	650	Keio Unib., Mitsubishi R., NEC, Eindhoven Unib.
5	140	1300	Keio Unib., Asashi G., Eindhoven Unib.
2,5	450	1300	Keio Unib., Mitsubishi R., NEC, Eindhoven Unib.
11	100	1300	Asashi G., Bell Labs, Lucent Tech.
1	1000	850	Asashi G., Eindhoven Unib.
4	300	850	Keio Unib., JST-ERATO, Asashi G.
40	100	1550	Unib. Southern California, Keio Unib.
		1325	Georgia Inst. Tech.

Polimerozko zuntz optikoak elementu pasibo bezala erabiltzeaz gain, osagai aktibo bezala ere erabil daitezke. Izan ere, nukleoko materiala mota desberdinetako molekula dopanteekin dopatuz gero, espektroaren eskualde ikusgai desberdinetan lan egin dezaketen laser-, anplifikagailu- eta kommutadore-optikoak eraiki daitezke [18],[19],[20]. PZOen fabrikazio tenperatura baxuagoek, beirazko zuntzekin alderaturik, hainbat motako material aktiboekin dopatzeko aukera eskaintzen digute, hala nola, lur arraroak, koloregai organikoak eta polimero konjokatuak. Koloregai organikoek eta polimero konjokatuak aurkezten duten xurgapen eta emisio gurutze-sekzio handien ondorioz, zuntz laburretan irabazi optiko altuak lortzea ahalbidetzen du.

1 II TAULA: AZKEN 40 URTEETAN PZOEKIN ERLAZIONATURIKO MUGARRI GARRANTZITSUENEN EBOLUZIO HISTORIKOA.

Urtea	Erakundea	Mugarria
1968	Dupont	Lehendabiziko MI PZO PMMA nukleoarekin.
1972	Toray	Lehenengo MI PZO poliestireno nukleoarekin.
1981	NTT	Atenuazio baxuko PMMA MI PZO (55 dB/km @ 568 nm)
1982	Keio Unib. NTT	Lehendabiziko IG PZO (1070 dB/ km @ 670 nm) Lehen MI PZO deuteraturiko PMMA nukleoarekin (20 dB/km @ 650 nm)
1983	Mitsubishi Rayon	PMMA "Eska" MI PZO (110 dB/km @ 570 nm)
1990	Keio Unib.	Abiadura altuko lehen transmisioa PMMA IG PZOren bitartez (3 GHz/km)
1992	Keio Unib.	Deuteraturiko PMMA IG PZO (55 dB/km @ 688 nm)
1993	Essex Unib. Keio Unib.	531 Mb/s transmisioa 100 m-tan PMMA MI PZOren bitartez Lehen PZOzko aplikagailua Errodamina B-rekin dopaturiko IG PZOren bitartez (27dB @ 591nm)
1994	Keio Unib., IBM Keio Unib., NEC Asahi Chemical	1 Gb/s transmisioa 30 m-tan IG PZOren bitartez 670 nm-tan 2.5 Gb/s transmisioa 100 m-tan IG PZOren bitartez 650 nm-tan Lehen nukleo anitzeko MI PZO
1995	Mitsubishi Rayon, NEC	156 Mb/s transmisioa 100 m-tan MI PZOren bitartez eta gorri koloreko LED bizkorrekin.
1996	Keio Unib., KAST	Lehen IG PZO PF (50 dB/km a 1300 nm) Galeren estimazio teorikoa PZO PF (0.3 dB/km a 1300 nm) Transmisio abiaduraren estimazio teorikoa IG PZOetan (PMMA: 4 Gb/s 100 m-tan; PF: 10 Gb/s 1 km-tan)
1997	POF Consortium of Japan Keio Univ., Fujitsu, Asahi Glass	ATM LAN estandarizazioa (156 Mb/s 50 m-tan MI PZO) ATM Forum-ean IEEE1394 normaren estandarizazioa (156 Mb/s 50 m-tan MI PZO) 2.5 Gb/s transmisioa 200 m-tan IG PZO PFren bitartez 1300 nm-tan
1998	COBRA, Eindhoven Univ., Keio Univ., Asahi Glass, NEC Matsushita	2.5 Gb/s transmisioa 300 m-tan IG PZO PFren bitartez 645 nm-tan 500 Mb/s transmisioa 50 m-tan IG PZOren bitartez eta eta gorri koloreko LED bizkorrekin.
1999	COBRA, Eindhoven Univ., Keio Univ., Asahi Glass Bell Labs, Asahi Glass	2.5 Gb/s transmisioa 550 m-tan IG PZO PFren bitartez 840 eta 1310 nm-tan 11 Gb/s transmisioa 100 m-tan IG PZO PFren bitartez 830 eta 1310 nm-tan
2000	Asahi Glass	IG PZO (Lucina) 16 dB/km-ko atenuazioarekin 1300 nm eta 569 MHz-km
2002		IEEE1394 estandarra berretsi eta ibilgailuentzako IDB-1394 osatu
2004	Asahi Glass	Lehen PMMA IG PZO komertzialki eskuragarri
2005	Chromis Fiberoptic	Lehen IG PZO PF komertzialki eskuragarri
2010	COBRA, Eindhoven Univ.	47.4 Gb/s transmisioa 100 m-tan IG PZO PFren bitartez 1300 nm-tan

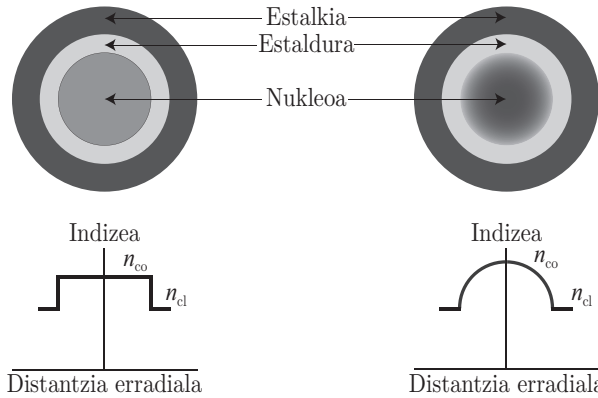
1.2 PZOen Egiturak eta Materialak

Polimeroak material amorfoak diren heinean, PZOak oso malguak eta zilindro itxurako uhin-gida dielektrikoak dira. 1.2 irudian ikus daitekeen bezala, normalean hiru geruzek osatzen dute PZOa, hau da, *nukleoa*, *estaldura* eta *estalkia*. Nukleoa osatzeko erabiltzen den polimeroaren errefrakzio indizea, estaldurarena baino altuagoa izan behar da zuntzaren barrutik barreiatzen den argiaren barne islatze totala gerta dadin.



1.2 irudia: PZO baten egitura.

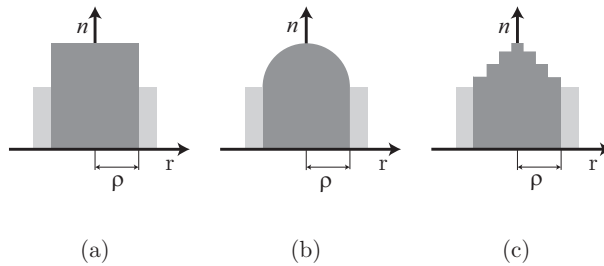
Normalean erabilitako PZOen *nukleo erradioak* (ρ), 125 eta 490 μm bitarteko tamaina izaten du, manipulazioa eta argiaren akoplamendua erraztuz [21]. Nukleoko materialaren errefrakzio indizea uniforme (maila-indizeko zuntzak) ala graduala (indize gradualeko zuntzak) izan daiteke, estaldurarena, normalean, uniforme izaten delarik. Alde batetik, maila-indizeko PMMA PZOen nukleoaren eta estalduraren errefrakzio indizeen balioak $n_{\text{co}} \approx 1.492$ eta $n_{\text{cl}} \approx 1.417$ izaten dira, hurrenez hurren. Beste alde batetik, indize gradualeko PZOetan, nukleoko errefrakzio indizea gradualki txikiagotzen da simetria ardatzaren distantziarekiko r . 1.3 irudiak bi motako PZOen errefrakzio indizeen profilak eta gurutze-sekzioak, eskematikoki azaltzen ditu. Kasu bietan V parametroa oso altua denez [22],[23], argiaren propagazioa moduen ikuspuntutik ikasi beharrean, argi-izpien ikuspuntutik ikas daiteke.



1.3 irudia: Maila-indizeko (ezkerra) eta indize gradualeko (eskuma) PZOen gurutzesezioak eta errefrakzio indizearen profilak.

1.3 PZOen Sailkapena

Errefrakzioa indizeari so eginez gero, PZOak hiru talde nagusitan bana daitezke, hain zuzen ere, maila-indizeko (MI), indize gradualeko (IG) eta multimaila-indizeko (MMI) zuntzetan. 1.4 irudiak errefrakzio indizeen ohiko profilak erakusten ditu. Edonola ere, beste profil batzuk dituzten zuntzak merkatuan eskuragarri daude, hala nola, nukleo anitzeko PZOak (NA PZO) edota mikroegituraturtako PZOak (MPZO).



1.4 irudia: Errefrakzio indizean araberako PZOen hiru talde nagusiak. (a) MI, (b) IG eta (c) MAI.

1.3.1 Maila-indizeko PZOak

Maila-indizeko PZOetan, errefrakzio indizearen profila honela definitzen da:

$$n(r) = \begin{cases} n_{co} & r < \rho \\ n_{cl} & r \geq \rho \end{cases} \quad (1.1)$$

$n_{co} > n_{cl}$ delarik.

Maila-indizeko PZOen transmisio abiadura maximoa, zuntz hauen dispersio modal altuak mugatzen du. Hala eta guztiz ere, egungo ikerketa lanek goi-mailako modulazioen bitartez arazo hau zeharkako tekniken bitartez ebatzi daitekeela frogatu dute [24],[25].

Distantzia laburreko telekomunikazioez gain, MI PZOak beste aplikazio batzuetan ere erabil daitezke. Industrial produkzio lerroetan eta automobil aplikazioetan, adibidez. MI PZO estandarretan, nukleoaren diametroa $980 \mu\text{m}$ izaten ohi da eta estalduraren lodiera $10 \mu\text{m}$. Zuntz hauen *zenbakizko irekidura* (*numerical aperture NA* ingelesez) 0.5 ingurukoa izaten da, argiaren akoplamendua errazten duelarik.

1.3.2 Indize Gradualeko PZOak

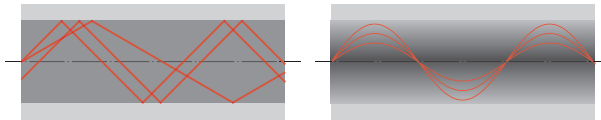
IG PZOek, nukleo diametro luzea eta malgutasun handia izateaz gain, banda-zabalera altuagoak izatearen abantaila dute. Errefrakzio indizea gradualki txikiagotzen da simetria ardatzaren distantziarekiko r (ikus 1.4 irudia):

$$n(r) = \begin{cases} n(0)\sqrt{1-2\Delta}(r/\rho)^g = n_{co}\sqrt{1-2\Delta}(r/\rho)^g & r \leq \rho \\ n(0)\sqrt{1-2\Delta} = n_{co}\sqrt{1-2\Delta} = n_{cl} & r > \rho \end{cases} \quad (1.2)$$

Δ ikurrak errefrakzio indizeen arteko desberdintasuna adierazten du:

$$\Delta = \frac{n_{co}^2 - n_{cl}^2}{2n_{co}^2} \quad (1.3)$$

eta g letrak profilarren esponentea. $g = 2$ denean profil parabolikoa izango dugu, eta g infiniturako joera duenean, maila-indizeko zuntzen kasu limitea. 1.5 irudiak errefrakzio indizearen profil desberdinen ondorioz (MI eta IG PZO), argia nola hedatzen den erakusten du.



(a) MI PZO

(b) IG PZO

1.5 irudia: Argiaren hedapena MI eta IG PZOetan.

Maila indizeko zuntzek duten dispertsio modala murrizteko aukera bat indize gradualeko profilaren bitartez izan daiteke [26]-[29]. IG PZOen nukleoa PMMA edota polimero perfluorinatu bezalako materialekin egin daitezke. 1 III Taulan ikus daiteke bakoitzaren ezaugarriak aipagarrienak.

1 III TAULA: PMMAZ ETA PFZ EGINIKO IG PZOEN EZAUGARRI NAGUSIEN LABURPENA

Ezaugarriak	PMMA IG PZO	PF IG PZO
Atenuazioa	150 dB/km @ 650 nm >1000 dB/km @ 850 eta 1310 nm	<40 dB/km @ 850-1310 nm 10 dB/km @ 1210 nm
Banda-zabalera · distantzia	2 GHz · km @ 650 nm	2 GHz · km
Lorturiko transmisio distantzia	200 m @ 2.5 GHz/s	110 m @ 11 GHz/s

1.3.3 Multimaila-Indizeko PZOak

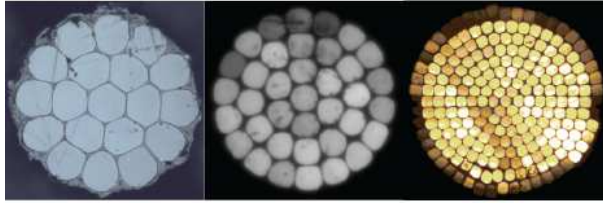
Multimaila-indizeko PZO baten nukleoa geruza desberdinekin osaturik dago, errefrakzio indizearen bilakaera profil parabolikoaren tankerara hurbiltzen delarik (ikus 1.4 irudia). IG PZOak garatzeko dauden arazo teknologikoak direla eta, MMI zuntza alternatiba egokia bilakatu da [30],[31]. Izan ere, MMI PZOen fabrikazio prozesua sinpleagoa da eta errefrakzio indizea denborarekiko, tenperatura fluktuazioekiko eta hezetasunarekiko egonkorragoa da.

Zuntz hauek, MI PZOen fabrikazio sinpletasuna eta IG PZOen banda-zabaleraren ezaugarri hobeak konbinatzen dituzte. Adibide gisa, 0.25 zenbakizko irekiduradun 3 geruzako MMI PZOren banda-zabalera 250MHz · 100 m-koa da, hots, IEEE1394/S400 estandarraren eskakizunak betetzen dituelarik [32].

1.3.4 Nukleo Anitzeko PZOak

Nukleo diametro handiak dituzten PZOek, diametro txikiagoko zuntzekin alderaturik, kurbadura bidezko galera handiagoak pairatzen dituzte. Tamaina txikiko zuntzak, ordea, zailagoak dira manipulatzeko eta argia akoplatzea ere konplikatuagoa da. Irtenbide posiblea nukleo anitzeko PZOen erabilera da [33]. Nukleo anitzeko zuntzak elkarrekin taldekaturik dauden tamaina txikiko nukleo-sorta batez osatzen dira, gurutze-sekzioaren ohiko diametroa milimetro batekoa izaten delarik.

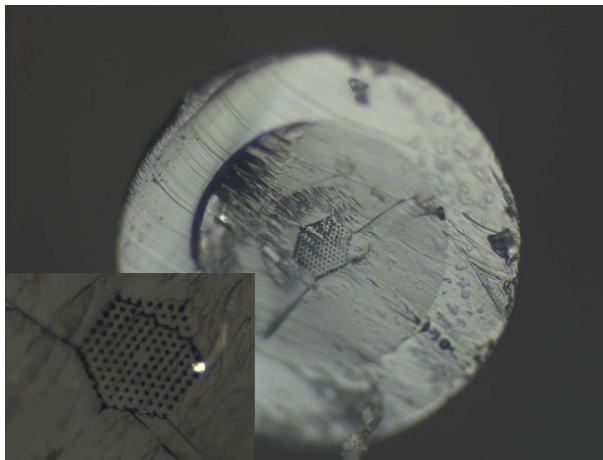
Nukleo anitzeko PZOak hamaika aplikazio desberdinetan erabiltzeko aproposak dira, berauek lortzeko dauden aukera desberdinak direla eta. Adibidez, transmisiorako eta sentsoreak eraikitze oso erabiliak izaten dira. 1.6 irudiak nukleo anitzeko PZOen hiru adibide erreal erakusten ditu.



1.6 irudia: Nukleo anitzeko PZOen hiru antolaketa posible desberdin [34].

1.3.5 Mikroegituratutako PZOak

Mikroegituratutako PZOa (MPZO), kristalezko zuntz fotonikoa bezala ezagutzen dena, uhin-gida mota erlatiboki berria da. Orain arte ikusitako PZOekin alderaturik, non argiaren hedapena errefrakzio indizeen aldaketekin dagoen erlazonaturik, zuntz hauetan airezko kanal mikroskopikoetatik zehar hedatzen da argia [35]. MPZOek modu-bakarreko zuntzen hedapen ezaugarriak izateaz gain, diametro handiko zuntzen abantailak ere aurkezten dituzte. Bestalde, argia zuntz hauetatik zehar airean zehar hedatzen denez, polimeroek argiari eragiten dioten atenuazioaren arazoa ekiditen da [36]. 1.7 irudian MPZO erreal baten irudia ikus daiteke.



1.7 irudia: MPZO baten irudia. Mikroegitura zonaldearen itxura hexagonala behe-
ezkerraldeko zoomean beha daiteke.

1.4 Atenuazioa

Zuntz optiko artez baten, argiaren potentzia esponentzialki txikiagotzen da hedapen distantziarekiko z , hurrengo espresioa jarraituz [37]:

$$P(z) = P(0)10^{-\alpha z/10} \quad (1.4)$$

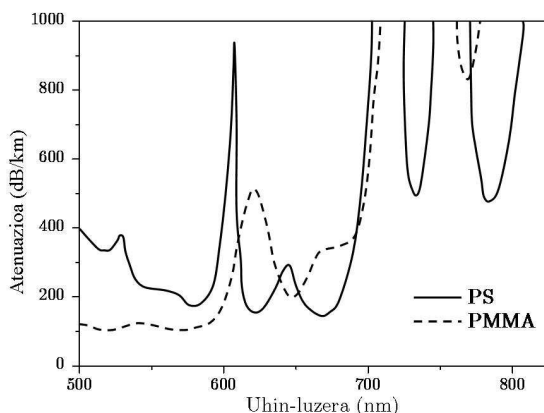
non α zuntz optikoaren *atenuazio koefizientea* den. Hau dB/km-ko unitateetan adierazten da eta modu honetan kalkula daiteke:

$$\alpha = -\frac{1}{z} 10 \log \frac{P(z)}{P(0)} \quad (1.5)$$

Atenuazioaren oinarriko mekanismoak, bi talde nagusitan bana daitezke: galera intrintsekoak, materialean dute jatorria eta fabrikazio prozesuaren independenteak dira, eta galera estrintsekoak, ezpurutasunen edo materialen prozesaketaren ondorio dira. Galera estrintsekoak fabrikazio prozesuaren optimizazioarekin ekidin daitezke, ez haatik galera intrintsekoak. Galera intrintsekoek mugatuko dute transmisio galeren muga.

Galera intrintseko eta estrintsekoen iturriak desberdinak dira. Galera intrintsekoaren adibidea bibrazioen ondoriozko zurgapena da. Polimeroaren hidrogeno atomoek malguki bateko masak bezala jarduten dute, eta, ondorioz, malgukiaren frekuentziako (eta bere harmonikoena) argia xurgatzen dute. Hau honela izanik, mota honetako galerak hidrogeno atomoak deuterioa bezalako atomo astunagokoekin ordezkatzuz gutxiagotu daitezke. Galera estrintsekoen iturri posibleen artean ezpurutasunak, materialaren homogeneotasun ezak eta polimeroaren inperfekzioak daude. Adibidez, atenuazio koefizientea nukleoaren diametroarekiko alderantzizko proportzionala da, hau da, diametroa txikiagotzen den heinean atenuazioa altuagoa izango da. 0.5 mm-ko PMMA PZOaren atenuazioa 89 dB/km-koa den bitartean (570 nm-tan), 0.25 mm PMMA PZOaren atenuazioa 130 dB/km-koa da. Portaera honen arrazoa nukleo txikiko PZOen egitura inperfekzioak dira. Nukleo txikiko zuntzen fabrikazio prozesua konplexuagoa da, eta, ondorioz, nukleoaren eta estalduraren arteko eskualdean inperfekzioa handiagoak daude.

1.8 irudiak nukleoaren materialak PZOen atenuazioan duen eragina erakusten du. PMMA PZOren kasuan, atenuazioaren minimo absolutu bi daude (89 dB/km) 522 eta 570 nm-tan kokatuta, eta honez gain, minimo erlatibo bat ere badago 650 nm-tan. PS PZOren kasuan, 114 dB/km-ko minimoa 670 nm-tan kokatua dago.



1.8 irudia: PMMA eta PS PZOen transmisio galeren espektroa [38].

PZOen atenuazioa neurtzeko teknika desberdinak existitzen diren arren, *cutback* metodoa, *OTDR* eta albo-argiztapen fluoreszentzia dira gehien erabiltzen direnak (ikus A Eranskina) [39],[40].

1.5 PZO Aktiboak

Konposatu aktiboekin dopaturiko PZOen garapena, eta hauetan oinarritutako gailuen garapena ere, asko aurreratu da azken urte hauetan. Honen arrazoa, beirazkoekin alderaturik, PZOeki dituzten abantailak dira. Alde batetik, polimerozko materialen zurruntasun mekanikoa altuagoa da eta fabrikazio teknologia errazagoa eta merkeagoa da. Beste alde batetik, PZOen fabrikazio tenperatura baxuagoek (180-200°C [41]-[43]), beirazko zuntzak fabrikatzeko behar direnarekin konparatuz (1000°C [44]), dopante luminiszenteeekin dopatzeko aukera eskaintzen digute, *hur arraroak*, *dopante organikoak* eta *polimero konjokatuak* bezalako materialekin dopa daitezkeelarik. Honez gain, dopante organikoek eta polimero konjokatuak argiarekin interakzio-probabilitate handiagoak dituztenez, zuntzaren distantzia laburragoetan irabazi hobeak lortzeko gaitasuna eskaintzen digute. Propietate hau oso interesgarria izan daiteke PZOetan oinarrituriko laser, anplifikagailu eta konmutadore konpaktuak erakitzerako orduan.

1.5.1 PZOzko Anplifikagailuak

1993. urtean Keio Unibertsitateko (Japonia) ikertzaileek PMMA IG PZOa erabilia, lehendabiziko PZOzko anplifikagailua demostratu zuten [18],[45]. Zehatzagoak izateko, Tagaya *et al.* zuntzaren nukleoko PMMA mate-

rialala oso ezaguna den Errodamina B-rekin dopatu zuten, dopante honek aurkezten dituen igorpeneko ezaugarri egokiak aintzat harturik. Metro erdiko zuntza, Nd:YAG laserraren bigarren harmonikoarekin kitzikatuz (532 nm), 27 dB-ko irabaziaren berri eman zuten 591 nm-ko uhin-luzeran. Hainbat aurrepenen berri eman da ordutik aurrera [46],[47].

1996. urtean, *Peng et al.* ikertzaileek anplifikazio optikoaren berri eman zuten MI PZO motako zuntza lehendabizikoz erabilia. 90 cm-ko zuntza erabilia 23 dB-ko irabazi garbia demostratu zuten 620 nm-ko uhin-luzeran. Aurreko kasuan legez, kitzikapena Nd:YAG laserraren bigarren harmonikoaren bitartez egin zen.

1 IV TAULA: DOPANTE DESBERDINEKIN DOPATURIKO PZOZKO ANPLIFIKAGAILUETAN ESPERIMENTALKI LORTURIKO IRABAZIEN EZAUGARRIAK

Dopantea	Irabazia (dB)	Seinaleren uhin-luzera (nm)	Zuntzaren luzera (m)	Erref.
Errodamina B	27	591	0,5	[18],[45]
Errodamina B	28	591	1	[46]
Errodamina B	23	620	0,9	[48],[19]
Errodamina B	36	580	0,9	[47]
Errodamina 6G	26	572	1,2	[49]
Errodamina 101 P.C.	13	598	2,2	[49]
567-Pirromezenoa	14	567	1,5	[49]
Perileno-gorria	20	597	1,6	[49]
P.-4-Oxadina	18	649	1	[49]
DCM	4	560	1	[50]
Errodamina B	23	630	0,6	[51]
Trimer	0,06	460	0,02	[52]
Pentamer	0,32	460	0,02	[52]
Heptamer	0,3	470	0,02	[52]

Hurrengo urteetan zehar, munduan zeharreko ikertzaileak PZOzko anplifikagailuen ezaugarriak hobetzen ahalegindu dira. Irabazi optikoa hobetzeko aukera posibleetako bat zuntzaren nukleoko dopantearen kontzentrazioa handitzea izan daitekeela pentsa badaiteke ere, dopantearen kontzentrazio altuegiak (saturazio mailan), materia aktiboaren molekulen arteko agregatuen sorrera ekar dezake, zuntzaren galerak handiagotuz. Adibide bat emateko, Errodamina B-rekin lortutako irabazia 10 ppm-ko dopante kontzentrazioarekin 27 dB-koa izan zen bitartean [18], 2500 ppm-ko kontzentrazioarekin 23 dB-koa izan zen [48]. Irabazia hobetzeko beste irtenbide posible bat dopante desberdinak erabiltzea da, irabazi maximoko uhin-luzera PMMA materialaren atenua-

zio baxuko zonaldera desplazatzeko asmoarekin. 1997. urtean, Tagaya *et al.* Errodaminak, 567-Pirromezenoa, Perileno-gorria, Perklorato-4-Oxadina eta DCM bezalako dopante organikoen amplifikazio ezaugarriak esperimentalki karakterizatu zituzten [49],[50]. Dopante guzti hauen amplifikazio ezaugarriak esanguratsuenak 1 IV Taulan ikus daitezke. Aipamen berezia merezi dute Perklorato-4-Oxadina [50] eta Errodamina B [51] dopanteekin lorturiko emaitzek. Hauekin, irabazi maximoa PMMA PZOekin gehien erabiltzen diren transmisio leihoetako batean gertatzen da, hots, 650 nm-tan.

Ohizko dopante organiko komertzialetatik at, polimero konjokatuak eta oligomeroak ere PZOetan erabiltzeko aproposak izan daitezke. Izan ere, irabazi egonkorra, irabazi-koefiziente altua eta atalase baxuak dituzten material aktiboak dira. Honetaz gain, PMMA matrizean dopaturiko polimero konjokatuak karga mugikortasun handia dutela ikusi da, konmutadore optikoak eraikitzeke ateak irekiz [52]. Hala ere, poli(9.9-dioktilfluoreno) (PFO) bezalako polimero konjokatuak ez dira oso ondo nahasten PMMA matrizean, molekula dopanteen agregatuak ager daitezkeelarik, eta, ondorioz, transmisio galerak areagotu [53].

1.5.2 PZOzko Laserrak

Laser sintonizagarrien garapenerako gertaera garrantzitsuenetakoa bat, 1966. urtean lehendabiziko laser-koloregaiaren demostrazioa izan zen, dopante organikozko medio aktiboaren bitartez [54]. Ordutik hona, hamaika motako molekula organikoekin lortutako laser-emisioei buruzko artikulua publikatu dira. 1967. urtean Soffer *et al.* ikertzaileek lehendabiziko egoera-solidoko dopante laserraren demostrazioa publikatu zuten [55]. Egoera-likidoko laserrekin alderatuz, egoera-solidokoak ez dira toxikoak, ez dira erregarriak eta zurruntasun mekaniko handiagoa daukate. Uhin-luzera egokian laseatuz gero, telekomunikazio-industriarako oso erakargarriak izan daitezke, bereziki LAN aplikazioetarako, argi-iturri koherente bezala erabiltzeko. Hala ere, lehendabiziko egoera-solidoko laserren fotoegonkortasuna ez zen oso altua, eta, ondorioz, kitzikapen periodo erlatiboki laburraren ostean emisio efizientzia asko kaltetzen zen. Gaur egun, ordea, arazo hau partzialki konpontzea lortu da, hobetutako dopante bariatate zabalaren sintetizazioaren bitartez [56].

Lehendabiziko laser emisioa dopaturiko PZO batean ez zen 1987. urtera arte demostratu [57]. Muto *et al.* Errodamina 6G dopantearekin dopaturiko 2 cm luze zen PMMA MI PZO zuntzan, %10eko malda-efizientzia erdies-tea lortu zuten 435 nm-ko uhin-luzeran eta optikoki 337 nm-tan kitzikatuz ostean. 1996. urtean, Gvshi *et al.* Errodamina 6Grekin dopaturiko beirazko

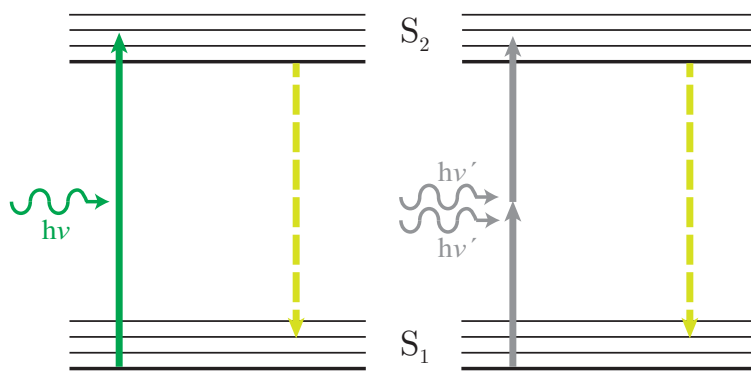
zuntz baten bitartez eta Nd:YAG laserraren bigarren harmonikoarekin kitzikatuz (532 nm), %2.8ko efizientzia lortu zuten [58], hau da, PMMA MI PZOaren kasuan baino hiru aldiz baxuagoa.

Kuriki *et al.* Errodamina 6G, Perilenoak eta Pirromezenoak bezalako dopante organikoekin dopaturiko IG PZO motako zuntzetan fotoegonkorra eta efizientea zen laser emisioa demostratu zuten [59]-[61]. Lortu zituzten emisioen uhin-luzerak 583 eta 640 nm tartean zeuden eta erabilitako zuntzak 5 cm-ko luzera zuten, hiru diametro desberdinekin, hots, 0.7 mm, 1.4 mm eta 2.1 mm. Malda-efizientziarik onena, %47a, 2.1 mm diametroko zuntzarekin lortu zen. Honez gain, [60] erreferentzian Perileno-laranjaz dopaturiko PZOzko laserraren eta dopante berarekin dopaturiko ohiko masa-laserraren arteko konparaketa burutu zuten. PZOzko laserren malda-efizientzia altuagoa eta atari-energia txikiagoa zela demostratu zuten. PZOzko laserretan malda-efizientzia %15 eta kitzikapen atari-energia 0.2 mJ-koa ziren bitartean, masa-laserretan ordea, %2.8 eta 0.6 mJ ziren, hurrenez hurren.

Aipaturiko zuntz-laser guztietan laser emisioa lortzeko, ispiludun barrunbearen beharra zegoen. Hala eta guztiz ere, irabazi handiko materialetan, laser-antzeko berezko igorpen anplifikatua (ASE, ingelesez *Amplified Spontaneous Emission* bezala ezagutzen dena) emititzea gerta daiteke, inolako barrunberen beharrik gabe [62]. ASE emisio ezaugarrien inguruan bigarren kapituluaren luze mintzatuko garen arren, auresan dezakegu laser erradiazioaren antzekoa dela aspektu askotan, hala nola, estutasun espektrala, direkzionaltasuna eta atari-energiaren existentzia, baina hauek ez daude hain garaturik [63]. 2002. urtean, Kobayashi *et al.* eta Howell *et al.* ikertzaileek, talde bakoitzak bere aldetik, PZO zuntzetan ASE emisioa demostratu zuten [64],[65]. Alde batetik, Kobayashi *et al.* PF2/6 polimero konjokatuarekin dopaturiko MI PZOetan ASE emisioaren berri eman zuten lehendabizikoz. Beste alde batetik, Howell *et al.* ikertzaileek %10ko ASE malda-efizientzia demostratu zuten 650 nm-ko uhin-luzera erakargarrian, DO11 dopante organiko arrunta erabiltuta.

Oraintxe aipaturiko ASE iturri-gorria, PZOen 650 nm-ko gardentasun leihoan erabiltzeko aproposa da, adibidez, LAN sareak eraikitzeko. Edonola ere, ez da uhin-luzera interesgarri bakarra. Izan ere, espektroaren eskualde urdinean lan egiten duten laserrak ere oso miretsiak dira hainbat aplikazioetan, besteak beste, medikuntza diagnostikoan, kirurgian, kapazitate handiko biltegi optikoetan, etab. Kobayashi *et al.* urdin koloreko (489 nm) ASE emisioaz ohartu ziren SP35 dopantearekin dopaturiko PMMA MI PZO erabiltuta [66]-[68]. Zuntza 1.4 cm-ko luzera zuen eta atari-irradiantzia $1.7 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ izan zen. Neurtutako galera 0.7 cm^{-1} izan zen bitartean, irabazi garbia 36 cm^{-1} -koa izan zen.

Dopanteetan gertatzen diren trantsizio garrantzitsuenak 2. Kapituluari azalduko diren arren, hurrengo lerroetan parentesi bat egin eta azalpen txiki bat emango dugu. 1.9 irudian ikus daitekeen legez, dopante organiko gehienek energia egoera elektroniko nagusi bi dituzte, S_1 eta S_2 , bakoitzak bibrazio-energia maila desberdinak dituztelarik [46]. Energia egoera elektroniko bakoitzeko bibrazio-mailen arteko trantsizioak oso azkarrak eta ez-erradiatzaileak direla kontutan hartuta, fotoien emisioa S_2 egoeraren oinarrizko mailatik, S_1 egoeraren bibrazio-mailetako batera gertatzen dela kontsidera dezakegu, eta fotoien xurgapena, S_1 egoeraren oinarrizko mailatik S_2 egoeraren bibrazio-mailetako batera gertatzen dela. Dopanteek xurgatzeko eta emititzeko duen gaitasuna, bakoitzaren absorzio eta emisio gurutze-sekzioen bitartez determinaturik egongo da, hau da, $\sigma_{abs}(\lambda)$ eta $\sigma_{emi}(\lambda)$ -en bitartez, hurrenez hurren. Ikus daitekeen bezala, gurutze-sekzioak argiaren uhin-luzeraren menpekoak dira. Xurgapen eta igorpen interakzioen probabilitate totala, bolumen unitateko dopante molekulen kontzentrazioarekiko menpekota ere bada. Adibide moduan, Errodamina B-ren kasuan, bere gurutze-sekzioak 10 000 aldiz handiagoak dira Erbioak beiran dituenekin konparatuz gero. Gertaera honek, dopaturiko zuntz luzera berdinerako xurgapen eta igorpen prozesu gehiago izatea ahalbidetuko du, gailu aktibo konpaktuagoak lor daitezkeelarik.



1.9 irudia: Fotoi-bateko (ezkerreko partean) eta fotoi-biko (eskumako partean) xurgapen prozesuak dopante molekulen ohiko energia diagraman. Xurgapen eta emisio prozesuak gezi-solidoaren eta gezi-marratuaren bitartez irudikatu dira, hurrenez hurren.

Laser gehienentzat, xurgapen eta igorpen prozesuen arteko energia galera ez-erradiatzailearen ondorioz, igorpenaren uhin-luzera ponpaketaren uhin-luzera baino luzeagoa izaten da. Hau egia da fotoi-bateko xurgapen eskema mantentzen den bitartetan, hau da, energia altuko bandarainoko molekula dopantearen trantsizioa $h\nu$ energiadun fotoi baten xurgapenaren ondorioa denean (ikus 1.9 irudiaren ezkerreko aldea). Hala ere, posibleak dira goi-

konbertsio ponpaketa eskemak, non, bi edo fotoi gehiago erabiltzen diren energia altuko bandarainoko molekula dopantearen transferentzia egiteko (ikus 1.9 irudiaren eskumako aldea). Fotoi-biko prozesuan xurgaturiko fotoien energien baturak, fotoi-bateko prozesuan xurgatzen den fotoiaren energia bera izan behar du, hau da, $2 \cdot h\nu' = h\nu$. Hau horrela izanik, emitituriko fotoiaren energia kitzikatzeko erabilitakoarena baino handiagoa izan daiteke, eta, ondorioz, uhin-luzera laburragoa izan. Fotoi-biko xurgapenaren abantailetakoa bat angeluarentzat soraioa izatea da, uhin-gida egituretarako erabil daitekeelarik.

He *eta al.* ikertzaileek, 1996. urtean, lehendabiziko goi-konbertsio laser igorpenaren inguruko artikulua publikatu zuten, polimerozko zuntza erabilia. Lan aitzindari honetan, beirazko estaldura zuen PZOa 610 nm-ko uhin-luzeran laseatzea lortu zuten, 1064 nm-ko uhin-luzeran kitzikatu ostean. Hau da, laser-igorpen ikusgaia lortu zuten infragorriko argiaren bitartez [69]. 2003. urtean Kobayashi *et al.* SP35-z dopaturiko eta erabat polimeroz egindako MI PZO zuntzean goi-konbertsio fotoluminiszentzia neurtzea lortu zuten [70]. 1 V Taulak dopante organiko desberdinekin dopaturiko PZOzko laserren igorpen ezaugarriak garrantzitsuenak erakusten ditu.

1 V TAULA: DOPANTE ORGANIKO DESBERDINEKIN DOPATURIKO PZOZKO LASERREN ESPERIMENTALKI LORTURIKO IGORPEN EZAUGARRIAK

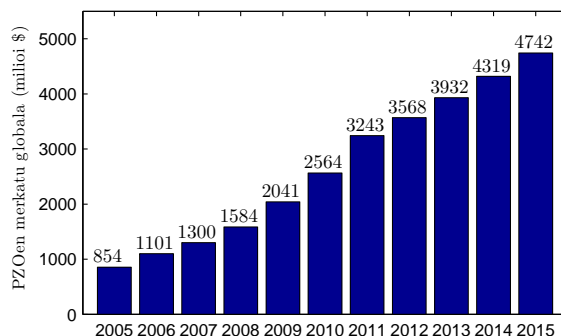
Dopantea	Laseo uhin-luzera (nm)	Malda- efizientzia	Ataria	Zuntzaren luzera (m)	Erref.
Errodamina 6G	--	10	--	0,02	[57]
ASPI	610	0,9	0,35 mJ	0,03	[69]
Errodamina 6G	568	2,8	0,12 mJ	0,01	[58]
Errodamina 6G	--	43	0,1 mJ	0,05	[59]
Errodamina 6G	590	24	0,1 mJ	0,05	[60],[61]
Errodamina B	618	20	--	0,05	[60],[61]
Perileno-Laranja	583	13	--	0,05	[60],[61]
567-Pirromezenoa	588	4	--	0,05	[60],[61]
Perileno-Gorria	640	3	--	0,05	[60]
605-Pirromezenoa	612	2	--	0,05	[60]
597-Pirromezenoa	586	1	--	0,05	[60]
SP35	489	--	1,7 mJ/cm ²	0,014	[66]-[68]
PF2/6	436	--	1,2 mJ/cm ²	0,015	[64]
DO11	650	10	0,04 mJ	0,051	[65]

1.6 PZOen Aplikazioak

Arestian aipatu dugun bezala, PZOek kostu baxuko elementuak erabiltzea ahalbidetzen digute, zuntz optikoen abantailak mantenduz. Hau dela eta, hainbat aplikazio garatzeko erabiltzen dira: ibilgailuetarako sare-optikoetan, komunikazio-sareetan, sentsoreak eraikitzeke, etxe-sareetan, etab. Hurrengo lerroetan zehar, gaur egun PZOak erabiliak izaten ari diren aplikazioez jardungo dugu.

1.6.1 Sare Lokalak (LAN)

PZOek aplikazio desberdinak garatzeko eskaintzen dizkiguten aukerak anitzak diren arren, LAN sare lokaletan erabiltzeko oso egokiak dira, gutxienez, ikuspuntu ekonomikotik begiraturik gero. Zehatzagoak izateko, PZOak oso egokiak dira etxeko komunikazio sareak eratzeko. 1.10 irudian PZOen mundu-mailako merkatuaren eboluzio estimatua irudikatu da.



1.10 irudia: PZOen mundu-mailako merkatuaren eboluzio estimatua.

Gaur egun PZOek 1 eta 40 Gb/s transmisio abiadura aurkezten dute, kobrezko pare bihurrituarena baino askoz ere altuagoa. Honez gain, ohiko zuntz optikoekin alderaturik, PZOen prezio baxuak eta manipulatzeko erraztasunak, sare domestikoak eratzeko aproposagoak bilakatzen dituzte.

Etorkizun ez oso urrun batean, PZOen merkatuaren eztanda gertatzea espero da, zuntza etxeraino edo ingelesez *fibre-to-the-home* (FTTH) ezagutzen den aplikazioaren eskutik. Hazkunde hau telekomunikazio-aplikazioen (%50ko igoera abiadura handiko datu transmisioetan) eta ibilgailu-aplikazioen (%32ko igoera PZOzko sareetan, argiztapen sistemetan eta neurgailuetan) gidaritza-

pean egingo da. Gainontzeko merkatu-puska, ordenagailu-aplikazio, argiztapena eta industria-aplikazioek barneratuko dute.

1.6.2 Automozio-aplikazioak

Gero eta ibilgailu gehiagok dituzte PZOzko sistemak integraturik kotte barneko elementu elektriko guztiak interkonektatzeko. Kotxeetan PZOak erabiltzearen onurak argiak dira, besteak beste, banda-zabalera handia, transmisio segurtasuna hobea, pisu gutxi, interferentzia elektromagnetikoekiko immunitatea eta instalazioa erraztasuna aurkezten dutelako.

Kotxe-sareetan CD, DVD, Bluetooth, mugikorak, etab. bezalako entretenimendurako gailuak elkar interkonektatzeko, PZO estandar desberdinak existitzen dira:

- D2B (Digital Domestic Bus) [71],[72].
- MOST (Media Oriented System Transport) [73].
- IDB 1394 (IEEE 1394 estandarraren ibilgailuetarako bertsioa) [74].
- ByteFlight [75].

Ibilgailuetako gailu elektrikoen kopurua eta konplexutasuna goraka doan heinean, nahi eta nahiez gero eta transmisio abiadura handiagoak ahalbidetzen dituen estandarraren beharra ekarriko du.

1.6.3 PZOetan Oinarrituriko Sentsoreak

Zuntz optikoak, seinale optikoak atenuazio baxuekin distantzia luzeetan transmititzeko erabiltzen diren arren, kokatuta dauden ingurunearen parametro fisikoak erregistratzeko kapaz ere badira. Hau horrela izanik, parametro horien sentsoreak eraikitzeke erabili daitezke.

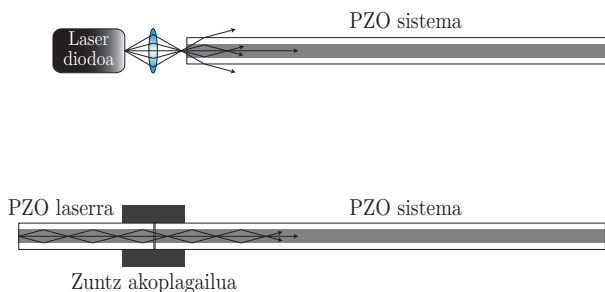
PZOen ohiko abantailez gain, zuntz hauen tamaina txikiari eta malgutasunari ezker, bolumen txikian sentsibilitate handia lortzeko aukera eskaintzen digute. Honez gain, PZOak hainbat parametro neurtzeko erabili daitezkeela demostratu da, tenperatura, hezetasuna, konposatu organiko eta inorganikoen presentzia, haizearen abiadura, errefrakzio indizea, etab. Parametro fisikoak neurketa PZOen bitartez egitea ahalbidetzen diguten mekanismoak ugarriak diren arren, kasurik gehienetan argi-intentsitatearen modulazioaren ondorioz izaten da.

Aipaturiko abantailak direla eta, zuntzetan oinarrituriko sentsoremerkatuak igoera nabarmena jaso du. PZOetan oinarrituriko sentsoreen kasuan, beirazko zuntzak erabilgarriak ez diren kasuetarako erabiltzen dira bereziki.

1.6.4 PZOetan Oinarrituriko Laser eta Anplifikaiguak

1.5 atalean ikusi den bezala, dopante organiko edo polimero konjokatuekin dopaturiko PZOak, erabat optikoak diren laserrak eta anplifikagailuak eraikitzeke aproposak dira. Honez gain, polimero konjokatuaren trantsizio elektronikoko bizkorak direla eta, konmutadore optikoak eraikitzeke posibilitatea eskaintzen digute.

PZOetan oinarrituriko laserraren aplikazio posibleetako bat 1.11 irudian ikus daiteke. Laser diodo batek igorritako argia modu-bakarreko zuntz baten bukaeran fokatu nahi izanez gero, argiaren frakzio txiki bat bakarrik fokatzea lortuko genuke zuntzaren nukleoan. Lente zilindrikoen laguntzarekin ere, argiaren parterik nagusia akoplamendu prozesuan galduko litzateke. PZOetan oinarrituriko laserrek arazo horri aurre egin diezaioke. Laserraren eta PZO-sistemaren zenbakizko irekidurek bat egiten badute, bi parteen arteko akoplamendua garbia da, era nabarmen batean akoplamendu-galerak ekidingo direlarik. Zuntz pasiboak elkarren artean konektatzen diren modu berean konekta daitezke PZOzko laserra eta PZO-sistema, 1.11 irudian ikus daitekeen bezala.

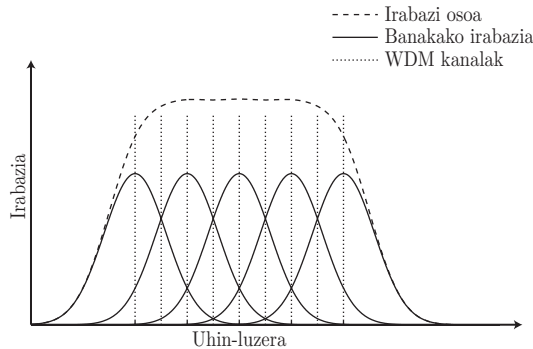


1.11 irudia: (Goian) Laser-diodo eta zuntzaren arteko akoplamendua. (Behean) PZOzko laser eta zuntzaren arteko akoplamendua.

Beste alde batetik, PZOzko laserrak eta anplifikagailuak banda-zabalera altuko telekomunikazio sistemetarako egokiak dira, adibidez, WDM (ingelesez *Wavelength Division Multiplexing*) teknologiarekin erabiltzeko. Uhin-luzera bakarrarekin (kanal bakarra) banda-zabalera konkretua daukagula kontutan harturik, zuntz beretik zehar n uhin-luzera desberdin hedatuko balira, n aldiz banda-zabalera altuagoa izatea lortuko genuke. WDM teknologia inplementatzeko erraza da, izan ere, uhin-luzera desberdinetako iturrien bitartez horni daiteke argiz kanal bakoitza, eta banaketa espektrala FBG (*Fibre Bragg Grating* ingelesez) bezalako elementu pasiboen bitartez egin daiteke.

WDM sistemaren amplifikazio-sistemak behar adineko zabalera espektralarekin amplifikatu beharko du eta gutxi gora-behera irabazi berdinarekin.

Dopaturiko PZOek argi-iturri eta irabazi zabaleko amplifikagailu moduan lan egin dezakete. Uhin-luzera desberdinen beharra, eskuragarri dauden dopante kopuru handiaren bitartez lor daiteke. Honez gain, banda zabaleko amplifikagailuak eraikitzeke, PZOen nukleoak aldi berean dopante desberdinekin dopa daitezke. 1.12 irudian ikus daitezkeen bezala, dopante bakoitzaren irabazi indibidualak teilakatu egiten dira, banda zabaleko kurba lortuz. Puntu-lerro bertikalak WDM kanalen posizioak dira. Dopante organikoekin eta euren kontzentrazioen aukeraketa oso garrantzitsua izango da, irabazi-kurba laua lortu nahi izanez gero.



1.12 irudia: Dopante desberdinen banakako irabazien teilakatzeak irabazi-kurba zabalagoa izatea ahalbidetzen du. Puntu-lerro bertikalak WDM kanalen posizioak dira

1.7 Tesiaren Testuingurua eta Helburuak

Tesi honek dopaturiko PZOen ezezagunak edota oso argi ez dauden igorpen ezaugarriak deskribatzen ditu. Alde batetik, igorpen ezaugarriek interresgarriak diren parametro fisiko desberdinekiko duten menpekotasunaren analisi teoriko sakona egin da, PZOentan oinarrituriko laserretan eta amplifikagailuetan. Beste alde batetik, lau polimero konjokatu desberdinekin dopaturiko PZOen ikerketa esperimentalak egin da, euren ezaugarri optikoak eta matrize ostalariaren eragina karakterizatzeko asmoarekin. Ikerketok oso baliozkoak dira baldintza desberdinetan kitzikaturiko PZO-aktiboekin igorpen jokaerak sakonago ulertzeko, eta, ondorioz, euren errendimendua hobetzeko.

Tesia honela antolaturik dago:

- Bigarren kapitulua erdieroale organikoekin eta polimero konjokatuarekin dopaturiko PZOen jokaera optikoak ulertzeko beharrezkoak diren oinarri teorikoetan oinarritzen da. Azalpenak, besteak beste, xurgapen

lineala, berezko igorpena, igorpen estimatua, berezko igorpen estimatua, seinale-irabazia eta fotoegonkortasuna bezalako fenomenoak barne hartzen ditu.

- Hirugarren kapituluak, bigarren kapituluan ikasitako fenomeno fisikoak kontutan hartzen dituen dopaturiko PZOen eredu teoriko eta konputazionala aurkezten ditu. Azalpenen artean denboraren menpeko tasa ekuazioak, ezaugarri optikoen parametro eta baloreen neurketak, ekuazioak askatzeko erabilitako ad hoc algoritmo numerikoak, etab. sartu ditugu.
- Laugarren kapitulua PZOzko laser eta anplifikagailuen simulazio konputazionalaz horniturik dago. Lan hau, hirugarren kapituluan azaldu-tako eredu konputazionalarekin egin da, potentziaren ikuspuntutik ez ezik, espektralki ere egin delarik. Kapituluan ikusitakoari erreparatuz gero, igorpen desplazamendu eta zabalera aldaketa espektralak, seinalearen uhin-luzera eta ponpaketa potentzia optimoak zuntzaren luzeraren menpe, zuntzaren zenbakizko irekidura eta dopantearen distribuzio erradiala bezalako kontzeptuak azalduko dira. Aipaturikoa maila-indize eta indize gradualeko PZOentzako erakutsiko da.
- Bosgarren kapituluan lau polimero konjokatu desberdinekin dopaturiko PZOen igorpen espektralaren eta fotoegonkortasunaren karakterizazio esperimentalak egin da. Neurketen artean: denboraren eta kitzikapen uhin-luzeraren menpeko igorpenaren eboluzioa, kitzikapen irradianzia desberdinekiko aldaketa espektralak eta zuntzaren zeharreko hedapenaren influentzia.
- Azkenik, seigarren kapituluak tesi-lan honetan zehar aipaturiko ondorio nagusiak laburbiltzen ditu.

1.8 Erreferentziak

- [1] K. C. Kao eta G. A. Hockham. "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies," *Proceedings IEEE*, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158. 1966.
- [2] "Sumitomo Corp." [Online]. Available: <http://www.sumitomocorp.co.jp>
- [3] Y. Koike, E. Nihei, N. Tanio eta Y. Ohtsuka. "Graded-index plastic optical fiber composed of methyl methacrylate and vinyl phenylacetate copolymers," *Applied Optics*, vol. 29, no. 18, pp. 2686-2691. 1990.
- [4] Y. Koike. "High-bandwidth graded-index polymer optical fibre," *Polymers*, vol. 32, no. 10, pp. 1737-1745. 1991.
- [5] Y. Ohtsuka, E. Nihei eta Y. Koike. "Graded-index optical fibers of methyl methacrylate-vinyl benzoate copolymer with low loss and high bandwidth," *Applied Physics Letters*, vol. 57, no. 2, pp. 120-122. 1990.
- [6] H. Murofushi. "Low loss perfluorinated POF," in *Proceedings of the fifth international conference on plastic optical fibres and applications-POF'96*, Paris (France), 1996, pp. 17-23.
- [7] J. Arrue. "Propagation in straight and bent plastic optical fibres, applied to the design of optical links, sensors and couplers," Ph.D. dissertation, UPV/EHU University of the Basque Country, 1999.
- [8] J. Zubia eta J. Arrue. "Plastic optical fibres: An introduction to their technological processes and applications," *Optical Fibre Technology: Materials, Devices and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 101-140. 2001.
- [9] Y. Koike eta M. Asai. "The future of plastic optical fiber," *NPG Asia Materials*, vol. 1, no. 1, pp. 22-28. 2009.
- [10] T. Kaino, K. Jinguji eta S. Nara. "Low loss poly(methylmethacrylate-d8) core optical fibers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 42, pp. 567-569. 1983
- [11] W. Groh eta A. Zimmermann. "What is the lowest refractive index of an organic polymer?" *Macromol.*, vol. 24, pp. 6660-6663. 1991.
- [12] Asahi Glass Company, "Lucina: Graded Index-Cytop Optical Fiber," Asahi Glass Company, Tokyo (Japan), Tech. Rep. T009E, July 2000.

- [13] Y. Koike. "High Bandwidth, Low-Loss Polymer Fibres," 18th European Conference on Optical Communication (ECOC'92), Berlin (Germany), 1992.
- [14] Y. Koike. "High-Speed Multimedia POF Network," 3rd International Conference on Plastic Optical Fibres and Applications (POF'94), Yokohama (Japan), 1994.
- [15] G. Giaretta, M. Wegmueller, R. V. Yelamarty, Proc. Optical Fiber Commun. Conf. PD-14 (1999).
- [16] T. Ishigure eta Y. Koike. "Design of POF for Gigabit Transmission," 12th International Conference on Plastic Optical Fibres (POF'94), Seattle (USA), 2003.
- [17] H. Yang, S. C. J. Lee, E. Tangdionga, C. Okonkwo, H. P. A. van den Boom, F. Breyer, S. Randel eta A. M. J. Koonen. "47.4 Gb/s transmission over 100m graded-index plastic optical fiber based on rate-adaptative discrete multitone modulation," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 352-359. 2010.
- [18] A. Tagaya, Y. Koike, T. Kinoshita, E. Nihei, T. Yamamoto eta K. Sasaki. "Polymer Optical Fiber Amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp. 883-884. 1993.
- [19] G. D. Peng, P. L. Chu, Z. Xiong, T. W. Whitbread eta R. P. Chaplin. "Dye-doped step-index polymer optical fiber for broadband optical amplification," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 2215-2223. 1996.
- [20] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, S. Nishihara, Y. Nishizawa, A. Tagaya eta Y. Koike. "High-efficiency organic dye-doped polymer optical fiber laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 3, pp. 331-333. 2000.
- [21] "Mitsubishi Rayon Co., Ltd.: Plastic Optical Fiber." Available: <http://www.pofeska.com/pofeskae/pofe/pofe.htm>
- [22] A. W. Snyder eta J. D. Love. "Optical waveguide theory" London: Chapman and Hall, 1983.
- [23] D. Marcuse. "Theory of dielectric waveguides" San Diego: Academic Press. 1974.
- [24] F. Breyer, S. Randel, H. van den Boom eta T. Koonen J. Lee. in Proc. Int. Conf. POF, 2008.

-
- [25] O. Ziemann et al. in Proc. Int. Conf. POF , 2008.
- [26] G. Yabre. “Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 166–177. 2000.
- [27] G. Yabre. “Theoretical investigation on the dispersion of graded-index polymer optical fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 6, pp. 869–877. 2000.
- [28] R. F. Shi, C. Koeppen, G. Jiang, J. Wang eta A. F. Garito. “Origin of high bandwidth performance of graded-index plastic optical fibers,” *Applied Physics Letters*, vol. 71, no. 25, pp. 3625–3627. 1997.
- [29] L. Jacomme. “Modal dispersion in multimode graded-index fibers,” *Applied Optics*, vol. 14, no. 11, pp. 2578–2584. 1975.
- [30] J. Zubia, G. Aldabaldetrekue, G. Durana, J. Arrue, H. Poisel eta C. A. Bunge. “Geometric optics analysis of multi-step index optical fibers,” *Fiber and Integrated Optics*, vol. 23, pp. 121–156. 2004.
- [31] S. Lee, L.-C. Paek eta Y. Chung. “Bandwidth enhancement of plastic optical fiber with multi-step core by thermal diffusion,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 39, no. 2, pp. 129–131. 2003.
- [32] “Mitsubishi Rayon Co., Ltd.: Eska-Miu.” Available: <http://www.pofeska.com>
- [33] H. Munekuni, S. Katsuta eta S. Teshima. “Plastic optical fiber for high-speed transmission,” in *Proceedings of the third international conference on plastic optical fibers and applications-POF’94*, Yokohama (Japan). 1994.
- [34] A. Berganza, G. Aldabaldetrekue, J. Zubia eta G. Durana. “Ray-tracing analysis of crosstalk in multi-core polymer optical fibers,” *Optics Express*, vol. 18, no. 21, pp. 22446–22461. 2010.
- [35] M. A. van Eijkelenborg, M. C. J. Large, A. Argyros, J. Zagari, S. Manos, N. A. Issa, I. Basset, S. Fleming, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke eta N. A. P. Nicorovici, “Microstructured polymer optical fibre,” *Optics Express*, vol. 9, no. 7, pp. 319–327. 2001.
- [36] R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell, P. J. Roberts eta D. C. Allan. “Single-mode photonic band gap guidance of light in air,” *Science*, vol. 285, pp. 1537–1539. 1999.

- [37] M. G. Kuzyk. "Polymer fiber optics. Materials, physics, and applications" Taylor & Francis, 2007.
- [38] T. Kaino. "Polymer optical fibers" in *Polymers for Lightwave and Integrated Optics*. Dekker, New York, 1992.
- [39] R. Kruhlak eta M. Kuzyk, "Side-illumination fluorescence spectroscopy. I. Principles," *JOSA B*, vol. 16, no. 10, pp. 1749-1755, 1999.
- [40] R. Kruhlak eta M. Kuzyk, "Side-illumination fluorescence spectroscopy. II. Applications to squaraine-dye-doped polymer optical fibers," *JOSA B*, vol. 16, no. 10, pp. 1756-1767, 1999.
- [41] M. Rajesh, M. Sheeba, K. Geetha, C. P. G. Vallaban, P. Radhakrishnan eta V. P. N. Nampoore. "Fabrication and characterization of dye-doped polymer optical fiber as a light amplifier," *Applied optics*, vol. 46, no. 1, pp. 106-112. 2007.
- [42] H. Liang, Z. Zheng, Z. Li, J. Xu, B. Chen, H. Zhao, Q. Zhang eta H. Ming. "Fabrication and amplification of Rhodamine B-doped step-index polymer optical fiber," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 93, pp. 681-685. 2004.
- [43] H. Liang, Z. Zheng, Z. Li, J. Xu, B. Chen, H. Zhao, Q. Zhang eta H. Ming. "Fabrication and amplified spontaneous emission of Eu(DBM)3Phen doped step-index polymer optical fiber," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 36, pp. 1313-1322. 2004.
- [44] S.B. Poole, D.N. Payne, R.J. Mears, M.E. Fermann eta R.I. Laming. "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, no. 7, pp. 870-876. 1986.
- [45] A. Tagaya, Y. Koike, E. Nihei, S. Teramoto, K. Fujii, T. Yamamoto eta K. Sasaki. "Basic performance of an organic dye-doped polymer optical fiber amplifier," *Applied optics*, vol. 34, no. 6, pp. 988-992. 1995.
- [46] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. "Theoretical and experimental investigation of Rhodamine B-doped polymer optical fiber amplifiers," *IEEE Journal of quantum electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 2215-2220. 1995.
- [47] A. Tagaya, T. Kabayashi, S. Nakatsuka, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High gain and high power organic dye-doped polymer optical

- fiber amplifiers: absorption and emission cross sections and gain characteristics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. 2705-2708. 1997.
- [48] G.D. Peng, P.L. Chu, Z. Xiong, T. Whitbread eta R.P. Chaplin. “Broadband tunable optical amplification in Rhodamine B-doped step-index polymer optical fibre,” *Optics Communications*, vol. 129, pp. 353-357. 1996.
- [49] T. Kobayashi, A. Tagaya, S. Nakatsuka, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. “High-power polymer optical fiber amplifiers in the visible region,” *Photonics and optoelectronic polymers*. Chapter 4, pp. 47-57.
- [50] A. Tagaya, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. “High-power and high-gain organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: novel techniques for preparation and spectral investigation,” *Applied optics*, vol. 36, no. 3, pp. 572-578. 1997.
- [51] H. Liang, Z. Zheng, Z. Li, J. Xu, B. Chen, H. Zhao, Q. Zhang eta H. Ming. “Fabrication and amplification of Rhodamine B-doped step-index polymer optical fiber,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 93, pp. 681–685. 2004.
- [52] J. Clark, L. Bazzana, D. D. C. Bradley, J. Cabanillas-Gonzalez, G. Lanzani, D. G. Lidzey, J. Morgado, A. Nocivelli, W. C. Tsoi, T. Virgili eta R. Xia. “Blue polymer optical fiber amplifiers based on conjugated fluorene oligomers,” *Journal of nanophotonics*, vol. 2, 023504. 2008.
- [53] A. Charas, A. L. Mendonça, J. clark, J. Cabanillas-Gonzalez, L. Bazzana, A. Nocivelli, G. Lanzani eta J. Morgado. “Gain and ultrafast optical switching in PMMA optical fibers and films doped with luminescent conjugated polymers and oligomers,” *Front. Optoelectron.*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53. 2010.
- [54] P. P. Sorokin eta J.R. Lankard. “Stimulated emission observed from an organic dye, chloro-aluminum phthalocyanine,” *IBM J. Res. Develop.*, vol. 10, pp. 162-163. 1966.
- [55] B. H. Soffer eta B. B. McFarland. “Continuously tunable, narrow-band organic dye lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 10, no.10, pp. 266-267. 1967.
- [56] A. Costela, I. Garcia-Moreno, C. Gomez, O. Garcia eta R. Sastre. “New organic inorganic hybrid matrices doped with rhodamine 6G as solid-state dye lasers,” *Appl. Phys. B*, vol. 75, pp. 827-833. 2002. [X14]

- S. Muto, A. Ando, O. Yoda, T. Hanawa eta H. Ito, "Dye laser by sheet of plastic fibers with wide tuning range," *Trans. IEICE Japan*, vol. E70, pp. 317-318. 1987.
- [57] S. Muto, A. Ando, O. Yoda, T. Hanawa eta H. Ito, "Dye laser by sheet of plastic fibers with wide tuning range," *Trans. IEICE Japan*, vol. E70, pp. 317-318. 1987.
- [58] R. Gvishi, G. Ruland eta P. N. Prasad. "New laser medium: dye-doped sol-gel fiber," *Optics Communications*, vol. 126, pp. 66-72, 1996.
- [59] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, S. Nishihara, Y. Nishizawa, A. Tagaya eta Y. Koike. "High-efficiency organic dye-doped polymer optical fiber lasers," *Applied physics letters*, vol. 77, no. 3, pp. 331-333. 2000.
- [60] T. Kobayashi, K. Kuriki, N. Imai, T. Tamura, K. Sasaki eta Y. Koike. "High-power polymer optical fiber lasers and amplifiers," *Proc. SPIE 3623, Organic Photonic Materials and Devices*, 206.1999.
- [61] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, Y. Koike eta Y. Okamoto. "Organic dye-doped polymer optical fiber lasers," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 11, pp. 612-616. 2000.
- [62] I. D. W. Samuel, E. B. Namdas eta G. A. Turnbull. "How to recognize lasing," *Nature photonics*, vol. 3, pp. 546-549. 2009.
- [63] M. Rajesh, M. Sheeba, K. Geetha, C. P. G. Vallaban, P. Radhakrishnan eta V. P. N. Nampoore. "Fabrication and characterization of dye-doped polymer optical fiber as a light amplifier," *Applied optics*, vol. 46, no. 1, pp. 106-112. 2007.
- [64] T. Kobayashi eta W.J. Blau. "Laser emission from conjugated polymer in fibre waveguide structure," *Electronics letters*, vol. 38, no. 2, pp. 67-68. 2002.
- [65] B. F. Howell eta M. G. Kuzyk. "Amplified spontaneous emission and recoverable photodegradation in polymer doped with Disperse Orange 11," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, no. 8 pp. 1790-1793. 2002
- [66] T. Kobayashi, W. J. Blau, H. Tillmann eta H-H Hörhold. "Blue amplified spontaneous emission from a stilbenoid-compound-doped polymer optical fiber," *Optics letters*, vol. 26, no. 24, pp. 1952-1954. 2001.

-
- [67] T. Kobayashi, W. J. Blau, H. Tillmann eta H-H Hörhold. “Blue lasing from a stilbenoid-compound-doped glass-clad polymer optical fibre,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 4, L1–L3. 2002.
- [68] T. Kobayashi, W. J. Blau, H. Tillmann eta H-H Hörhold. “Light amplification and lasing in a stilbenoid compound-doped glass-clad polymer optical fiber,” *IEEE Journal of quantum electronics*, vol. 39, no. 5, pp. 664-672. 2003.
- [69] G. S. He, J. D. Bhawalkar, C. F. Zhao, C. K. Park eta P. N. Prasad. “Upconversion dye-doped polymer fiber laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 25, pp. 3549-3551. 1996.
- [70] G. Jordan, T. Kobayashi, W. J. Blau, S. Pfeiffer eta H-H Hörhold. “Frequency upconversion of 800 nm ultrashort pulses by two-photon absorption in a Stilbenoid compound-doped polymer optical fibre,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 13, no. 10, pp. 751-754. 2003.
- [71] “C & C Electronics: About D2B,” 2001. Available: <http://www.candc.co.uk>
- [72] W. Daum, J. Krauser, P. E. Zamzow eta O. Ziemann. “POF: Polymer optical fibers for data communication” Berlin: Springer, 2002.
- [73] “MOST specification of physical layer, rev. 1.0, ver. 1.0-0,” Feb. 2001. Available: <http://www.mostcooperation.com>
- [74] “What is IDB-1394.” Available: <http://www.firewire-1394.com>
- [75] “What is byteflight” Available: <http://www.byteflight.com>

2. Kapitulu

Dopaturiko PZOak: Oinarri Teorikoa

Laburpena— Bigarren kapitulu erdieroale organikoekin eta polimero konjokatuekin dopaturiko PZOen jokaera optiko desberdinak ulertzeko beharrezkoak diren oinarri teorikoetan oinarritzen da. Azalpenak, besteak beste, xurgapen lineala, berezko igorpena, igorpen estimulatua, berezko igorpen estimulatua, seinale-irabazia eta fotoegonkortasuna bezalako fenomenoak barne hartzen ditu.

Erdieroale organikoekin eta polimero konjokatuekin dopaturiko polimerozko zuntz optikoak laser eta anplifikagailu erabat optikoak eraikitzeke aproposak izan daitezke. Izan ere, zuntz hauek polimero-materialen malgutasun mekanikoa eta erdieroale inorganikoen ezaugarriak batzen dituzte. Honez gain, dopante hauek PZOen nukleoan erraz txerta daitezke [1], trantsizio elektroniko bizkorak dituzte [2] eta euren fotoegonkortasuna hobetu egiten da PZOen nukleoan txertatzen direnean [3].

Kapitulu honetan PZOetan txertaturiko erdieroale organiko eta polimero konjokatuen ezaugarri fisikoez gain, argiarekin dituzten interakzioak ere ikertuko ditugu. Ezaugarri hauen ezagutza ona hagitz garrantzitsua da PZOzko laserren eta anplifikagailuen portaera egokiro deskribatzen duen eredu matematikoa garatzeko. Eredua kuantitatiboki zehatza izan daitekeenez, interesgarriak izan daitezkeen parametro fisiko desberdinen menpeko PZO aktiboen igorpen ezaugarriak kalkulatzeko balio diezaguke. Ikusiko den bezala, gure beharretara egokituriko eredu garatu dugu.

Kapitulua honela antolatu da. Lehenengoz, erdieroale organiko eta polimero konjokatuen sarrera orokorra egin da, dopante hauek PZO aktiboetan erabiltzeko zergatik diren aproposak jakiteko. Honen ostean, PZOetan txertaturiko material dopantearen eta argiaren arteko interakzio mota desberdinez gain, seinale-irabazia eta fotoegonkortasuna bezalako kontzeptuen berri ere eman da. Azkenik, hainbat ideia ondorioztatu dira.

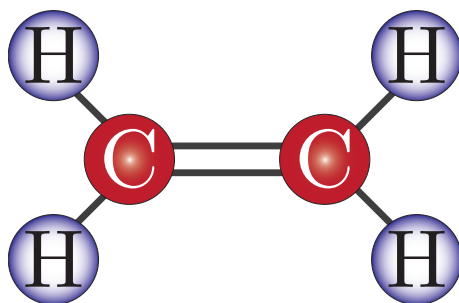
2.1 Erdieroale Organikoak eta Polimero Konjokatuak

Historikoki ‘erdieroale’ hitza Si, Ge, InGaAs eta InP bezalako material kristalino inorganikoak adierazteko erabili izan da. Erdieroaleen ezaugarri elektrikoak kontrolatzeko fabrikazio prozesuan zehar dopante egokiak txertatu behar dira, erdieroale estrintsekoak lortuz. Si eta Ge-ren kasuan, erabilitako dopanteak taula periodikoko V. Taldekoak (P, As edo Sb) badira, orduan, N motako erdieroalea lortuko dugu. Taula periodikoko III. Taldekoak badira (Al, Ga, B edo In), orduan, P motako erdieroalea lortuko dugu. Erdieroale inorganikoen ezaugarri elektrikoak kontrolatzeko gaitasuna hainbat aplikazio desberdin garatzeko klabea izan da. Adibide gisa, N motako eta P motako erdieroaleak elkartzuz gero, diodo bat eraiki daiteke, eta N motako erdieroalea P motako erdieroale birekin inguratuz gero, PNP transistorea eraiki daiteke.

Polimeroak normalean makromolekula organikoak dira, monomero edo molekula txikiagoek bat egiterakoan sortzen direlarik. Polimero-materialez inguraturik gaude gure egunerokotasunean, zama-poltsetatik hasita kirurgiako torloju biodegradagarrietara heldu arte. Polimeroen familia kimikoa material desberdin askorekin osatzen da, ia edozein eskakizun mekaniko lor daitekeelarik. Horretarako, polimero-materialen egitura kimikoa aldatzea besterik ez dago. Hau horrela izanik, polimetilmetakrilatoa (PMMA) bezalako material malgu eta gardena, edo polibinil kloruroa (PVC) bezalako material zurrun eta gogorra, fabrika daitezke.

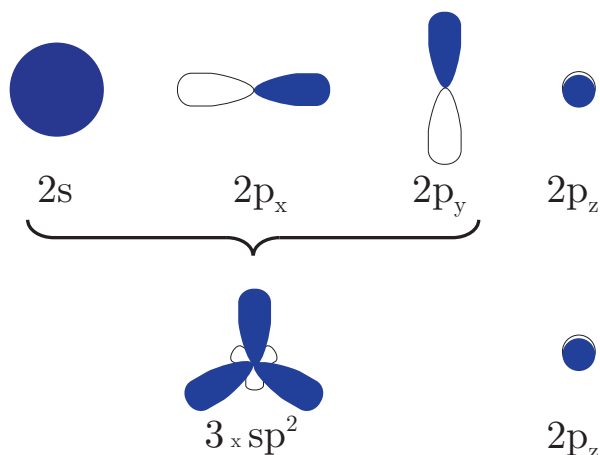
Polimero konbentzional hauen ezaugarri ohikoetako bat isolamendu elektriko da. Honek azaltzen du zergatik kable elektrikoak polimero-materialekin estaltzen diren. Edozelan ere, 1970. urtean Shirakawa ikertzaileak lehendabizikoz ezaugarri erdieroaleak zituen polimero berezia garatu zuen [4]-[6]. Lan honen oihartzunaren ondorioz, 2000. urtean kimikako Nobel sariarekin saritua izan zen. Polimero erdieroaleek, erdieroale organiko izenarekin ere aski ezagunak direnek, polimero-materialen malgutasun mekanikoa eta erdieroale inorganikoen ezaugarri elektronikoak konbinatzen dituzte. Polimero konjokatuak erdieroale organiko mota bereziak dira, izan ere, polimero molekulen ato-

moak lotura simple eta bikoitzak tartekatuz osatzen dira. Lehendabiziko polimero konjokatu elektroluminiszentea 1990. urtean Burroughes *et al.* ikertzaileek aurkitu zuten. Orduetik hona egindako aurrerapenei esker, optoelektronikaren esparruan hainbat aplikazio garatzea lortu da: zelula fotovoltaikoak [8], eremu-efektuko transistoreak [9], fotodetektagailuak [10], diodo argi-igorle organikoak [11], laser-diodo inorganikoen ordeztiko bezala erabiltzeko, etab. Honez gain, polimero konjokatuarekin dopaturiko eta optikoki kitzikatu daitezkeen laserrak ere garatu dira. Esparru honek eta polimero konjokatuarekin dopaturiko amplifikagailu optikoen esparruak ere, azken urteetan interes handia lortu dute ikertzaileen artean.



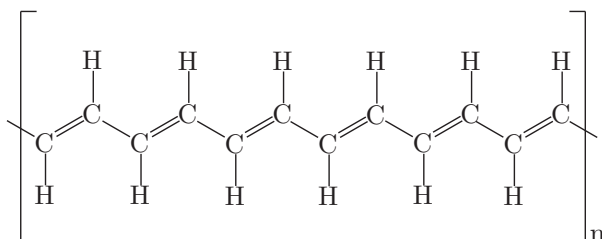
2.1 irudia: Eteno-molekularen (C₂H₄) egitura kimikoa.

Erdieroale organikoen ezaugarri optikoak ondo azaltzeko asmoz, euren lotura kimikoen eragina laburbilduko dugu. Konposatu organikoak, luzera eta geometria desberdinetako kateetan elkarren artean lotutako karbono atomoetan oinarritzen dira. Karbono atomoak, era berean, beste motako atomoekin loturik daude. Molekula konjokatuetan, karbono atomoak lotura simple eta bikoitzak tartekaturik dituzten luzera desberdinetako kateen bitartez kobalenteiki lotuta daude. 2.1 irudiko Etenoaren egitura elektronikoan ikus daiteke nola karbono atomoek lotura bikoitza sortzen duten. Lotura bikoitz hau nola sortu den ulertzeko, has gaitezen karbono atomoaren egitura elektronikoarekin, hots, $1s^2 2s^2 2p^2$ [12]. Bi karbono atomoen arteko lotura kanpoko geruzan dauden bi s elektroien eta bi p elektroien bitartez gertatuko litzateke. Posiblea izan daiteke s eta p orbitalen arteko hibridazioa gertatzea, hiru sp^2 orbital sortuz. 2.2 irudian ikus daitezkeen moduan, s orbitalaren eta bi p orbitalen ($2p_x$ eta $2p_y$) arteko hibridazioaren ondorioz hiru sp^2 orbital sortzen dira. Orbital hibridoak planokideak dira eta elkarren artean 120° biraturik daude. Hirugarren p orbitalak ($2p_z$), ordea, ez du inolako aldaketarik pairatzen eta sp^2 hibridazioarekiko perpendikular mantentzen da. Karbono atomoen lotura orbitalak hiru sp^2 eta $2p_z$ orbitalen bitartez osatzen dira.

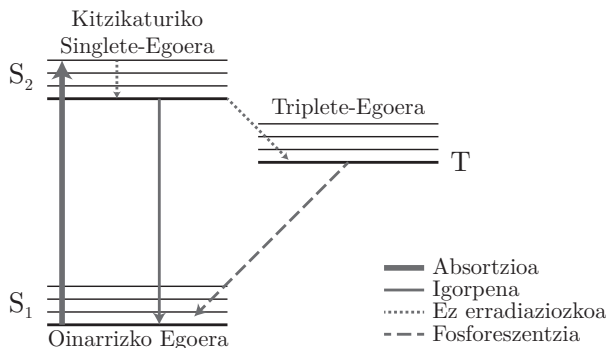


2.2 irudia: Bi p orbitalen ($2p_x$ eta $2p_y$) eta $2s$ orbitalaren arteko hibridaziotik, hiru sp^2 orbital lortzen dira. $2p_z$ orbitalak ez du aldaketarik jasotzen.

Bi lotura mota posible daude Eteno molekularen bi karbono atomoen artean, σ eta π loturak hain zuzen ere. σ -loturak sp^2 orbitaletatik sortutakoak dira. Karbono atomo bakoitza beste karbono atomo batekin eta hidrogeno atomo birekin σ -loturen bitartez lotu ahal da. Mota honetako loturak karbono eta hidrogeno atomoen artean lokalizazio handiko elektroio dentsitatea sortzen du. Karbono atomo bien arteko $2p_z$ orbitalek elkarren artean lotzen direnean π -lotura osatzen dute. Beraz, lotura bikoitza karbono atomo bien arteko σ eta π loturen bitartez osatzen da. π -lotura oso zurruna da eta lotura mota honek deslokalizaturiko elektroio dentsitatea sortzen du karbono atomoen planoaren goiko eta beheko aldean [12]. Hala ere, π -loturako elektroioak, σ -loturan daudenak baino ahulago loturik daude. Honek karbono atomoen π -loturen arteko elektroioen mugikortasuna egotea suposatzen du, eta, ondorioz, elektrizitatearen konduktibitatea. π -loturak dira, beraz, ezaugarri erdieroaleen arduradunak. π orbitalek energia-hutsune batekin banaturiko bi energia maila osatzen dituzte: balentzia-banda eta eroapen-banda. Erdieroale organiko eta polimero konjokatuaren energia-hutsune ohikoa 1.5 eV eta 3 eV tartekoa da, hau da, espektroaren alde ikusgaitik hasita infragorriaraino.



2.3 irudia: Lotura simple eta bikoitzak tartekatzen dituen trans-poliazetileno egitura.



2.4 irudia: Erdieroale organiko ohiko baten Jablonsky diagrama sinplifikatua.

Edozein erdieroale organiko konjokaturiko sistema moduko batez osaturik dago. Kasu batzuetan, distantzia erlatiboki laburretan konjokaturiko molekula txikien bitartez osaturik daude, baina polimero klasikoetan π sistema kate osoan zehar hedatzen da. 2.3 irudian ikus daiteke nola trans-poliazetileno polimero klasikoan konjugazioa polimeroa kate guztian zehar hedatzen den.

Dopante organiko eta polimero konjokatuak mota desberdinetako atomoez osaturik daude, eta, ondorioz, molekula hauen energia-egiturak sistema konplexuak izaten dira. Molekula hauek energia-maila desberdinekin osaturik daude: singlete, triplete, dimeroa... [13]. 2.4 irudian erdieroale organiko ohiko baten Jablonsky diagrama sinplifikatua ikus daiteke, non S_1 oinarrizko egoera elektronikoa, S_2 kitzikaturiko singlete-egoera eta T triplete-egoera adierazten duten. Maila bibrazionalak ordezkatzan dituzten energia-egoerak oso gertu banaturiko dauden elektroiek okupa ditzaketen energia azpi-maila horizontalez osaturik daude. Azpi-maila hauek molekulen errotazioaren ondorioa dira.

Hurrengo ataletan zehar, energia egoera desberdinen arteko trantsizioen ikerketa sakonagoa egingo dugu, PZOen material dopantearen eta argiaren arteko interakzioak hobeto ulertzen ahalbidetuko gaituelarik.

2.2 Xurgapen Lineala

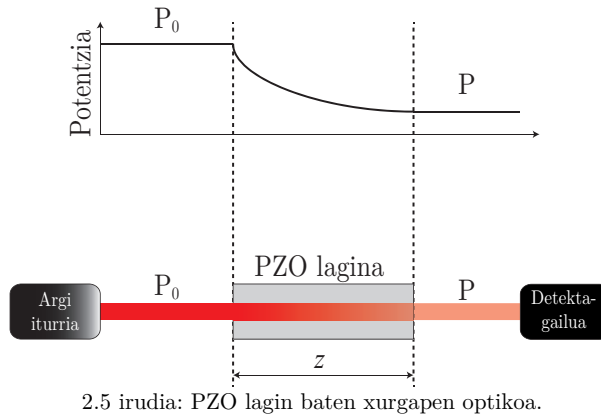
Xurgapenak argia xurgatzearen prozesu fisikoa adierazten duen bitartean, *absorbantziak* kantitate matematikoa adierazten du, eta honela kalkula daiteke [14]:

$$A = \log_{10} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (2.1)$$

P_0 argiaren potentzia da zuntzaren serreran eta P transmitituriko potentzia zuntzaren irteeran. Zuntz optiko baten galera optikoak dB-tan ere adieraz daitezke, hurrengo eran:

$$dB_loss = 10 \log_{10} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (2.2)$$

2.5 irudiak PZO batetik zeharreko argi-potentziaren eboluzioa adierazten du.



Polimerozko zuntz optiko batetik zeharreko argi-potentzia esponenztialki erortzen da propagazio distantziarekiko, Beer-Lamber legearen arabera:

$$P = P_0 e^{-\alpha(\lambda)z} \quad (2.3)$$

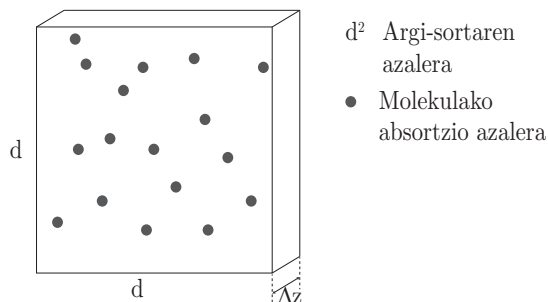
αz adimentsionala denez, *atenuazioa koefizientea* α , cm^{-1} edo mm^{-1} ($\text{Np} \cdot \text{cm}^{-1}$ edo $\text{Np} \cdot \text{mm}^{-1}$ unitateen baliokidea) unitateetan adierazten da. Azken bi ekuazioak erabilita hurrengo erlazioa lor dezakegu:

$$dB_loss = 10 \log_{10} \left(\frac{P_0}{P} \right) = 10 \log_{10} \left[e^{\alpha(\lambda)z} \right] = 10\alpha(\lambda)z \log_{10} e$$

$$\frac{dB_loss}{z} = 4.34\alpha \quad (2.4)$$

Atenuazio koefizientea xurgapen gurutze-sekzioarekin (σ_{abs}) eta kitzikatu gabeko energia egoerako molekula dentsitatearekin (N_1) (oinarrizko egoera) erlazonaturik dago:

$$\alpha(\lambda) = \sigma_{abs}(\lambda) N_1 \quad (2.5)$$



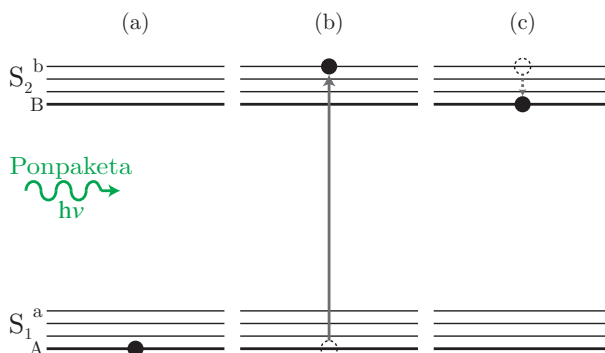
2.6 irudia: Dopante molekula bakoitzak bere xurgapen gurutze-sekzioaren berdina den azalerako argia xurgatzen du.

Atenuazio koefizientearen unitateek alderantzizko luzerako dimentsioa dutenez (m^{-1}), xurgapen gurutze-sekzioaren eta oinarritzko egoerako molekula dentsitatearen unitateak m^2 eta m^{-3} dira, hurrenez hurren. Xurgapen gurutze-sekzioa molekula bakoitzaren ezaugarria da eta molekularen xurgapeneko azalera efektiboa adierazten du. Beste hitz batzuekin esanda, bertatik pasatzen den fotoi bat xurgatzeko molekulak duen azalera efektiboa adierazten du. 2.6 irudian adierazten den bezala, d^2 azalerako argi-sorta batek molekula multzo batekin topo egiten denean, molekulen xurgapeneko azalaretatik igarotako argia bakarrik izango da xurgatua (molekula guztiak kitzikatu gabeko energia mailan daudela kontuan hartuz gero). Xurgapeneko gurutze-sekzioa molekularen tamaina fisikoa baino handiagoa ala txikiagoa izan daiteke. Honez gain, kontuan hartu behar da molekulen xurgapeneko gaitasuna ez dela konstantea, argiaren uhin-luzerarekiko aldakorra baita.

Xurgapeneko prozesua hobeto ulertzeko asmoarekin, 2.7 irudian fotoi erasotzaile batek eta dopante molekulak nola elkar eragiten dioten erakusten da. S_1 -tik T-rako trantsizio zuzena ez da kontsideratu, trantsizio hau galarazita baitago banaketa nuklear handiagoaren ondorioz [15]. Molekula dopanteak fotoi erasotzailea xurgatu ahal izateko, fotoi erasotzailearen energiak nahikoa izan behar du trantsizioa kitzikatzeko oinarritzko egoerako A azpi-mailatik S_2 egoerako b bibrazio azpi-mailara. Hortaz, xurgapeneko espektroaren maximoa $E_b - E_A = h\nu$ -ri dagokio, eta bere uhin-luzera honela kalkula daiteke:

$$\lambda_{bA} = \frac{hc}{E_b - E_A} \quad (2.6)$$

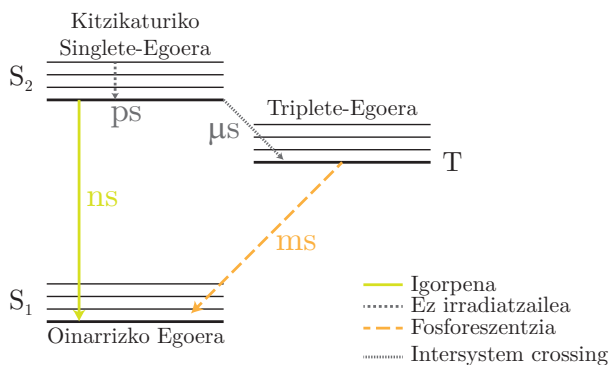
non h eta c Planck-en konstantea ($4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$) eta argiaren abiadura hutsean ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) diren, hurrenez hurren. Xurgapenaren ostean, kitzikaturiko molekulak S_2 -ren azpi-maila bibrazional baxuenera desintegrazio ez-erradiatzailea jasotzen du: $b \rightarrow B$. Fotoi-igorpen gabeko prozesu hau oso bizkorra da, eta sistemako energia totalaren berregituratzearen ondorioa da. Energia hau, kasurik gehienetan, temperatura igoera edo bero bezala eraldatzen da. Kapituluaren bukaeran ikusiko dugu bero honek eragin negatiboa duela dopaturiko PZOen egonkortasunean, fluoreszentzia igortzeko kapazitatea gutxiagotzen duelarik.



2.7 irudia: Fotoi baten xurgapena. (a) Elektroia oinarrizko egoeran. (b) Elektroia kitzikaturiko egoerara sustatua fotoi erasotzaile baten energiaren bitartez. (c) Elektroien ez-erradiaziozko desintegrazio oso bizkorra.

2.3 Igorpena

Xurgapen prozesuaren ostean, eta behin kitzikaturiko elektroia S_2 -ren azpi-maila bibrazional baxuenean dagoenean, molekulak prozesu desberdin biren ondorioz igor dezake argia: fluoreszentzia eta fosforeszentzia. Fluoreszentzia elektroia baten erradiaziozko energia galera da, hain zuzen ere, S_2 egoera kitzikatutik S_1 oinarrizko egoerara igarotzean. Fosforeszentzia erradiaziozko energia galera ere bada, baina kasu honetan, T triplete-egoeratik S_1 oinarrizko egoerara igarotzean. Fosforeszentzia gertatu baino lehenago transferentzia ez-erradiatzailea gertatu behar izan da, S_2 kitzikaturiko singlete-egoeratik T triplete-egoeraraino. Prozesu hau *sistema-arteko pasagunea* edo, ingelesez, *intersystem crossing* bezala ezagutzen da [15].

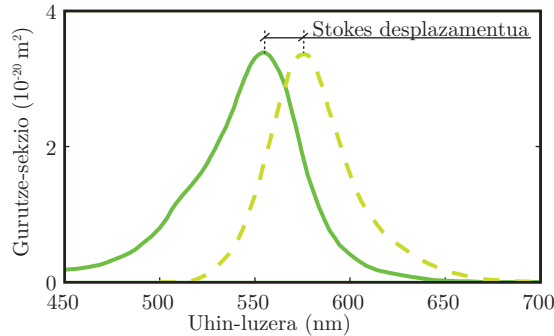


2.8 irudia: Dopante organikoen ohiko denbora eskalak.

PZOetan oinarrituriko laser edo amplifikagailuak garatzeko dopante bat aproposa den ala ez jakiteko, kitzikaturiko egoera desberdinen bizi-luzerak ezagutzea garrantzitsua da. 2.8 irudian ikus daitezkeen bezala, prozesu hauen denbora eskala ohikoak hurrengoak izaten dira: pikosegundoak trantsizio ez-erradiatzaileetan [16], mikrosegundoak sistema-arteko pasagune prozesuetan [17], milisegundoak fosforeszentzia prozesuetan [18] eta nanosegundoak fluoreszentzia prozesuetan [19]. Fosforeszentzia prozesu geldoa denez, triplete-egoeran molekula-populazio altua ekiditea komeniko litzateke, amplifikagailu edo komutadore ultra-bizkorak eraikitzeke. Tesi-lan honetan erabilitako kitzikapen laser-pultsuak aski laburrak dira triplete-egoeraren existentzia mesprezatzeko [16]. Honetaz gain, tesilari honetan erabilitako dopanteek sistema-arteko pasagune tasa baxuak dituzte, 2.4 irudiko energia-diagrama bi energia mailako sistemara sinplifikatzeko aukera eskainiz [20].

Arestian aipa dugun legez, xurgapenaren eta fluoreszentzia-igorpenaren artean ez-erradiatzaileko energia galera gertatzen da. Hau dela eta, igorritako fotoiak xurgaturiko fotoiak baino energia baxuagoa du, hau da, uhin-luzera luzeagoa du. Xurgapenaren eta igorpenaren uhin-luzera maximoen arteko aldeari *Stokes desplazamendua* edo, ingelesez, *Stokes shift* deitzen zaio. Polimero konjokatuaren xurgapen eta igorpen espektroak normalean ispilu-irudiak izaten dira, Stokes desplazamendu txiki batekin. Ispilu-irudiak izaten dira, izan ere, xurgapenean gertatzeko aukera gehiago dituzten prozesuek, igorpenean gertatzeko aukera gehiago ere baitituzte [19]. Hau honela izanik, molekularen xurgapeneko azalera efektiboak adierazten duen xurgapen gurutze-sekzioa jakinda, baita, molekularen igorpeneko azalera efektiboa adierazten duen igorpen gurutze-sekzioa jakin dezakegu, hots, σ_{emi} [19]. 2.9. irudian Errodamina B dopantearen xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioak PMMA materialean ikus ditzakegu, [16] erreferentziatik lortuak. Dopante organikoak eta polimero konjokatuak erabiltzearen abantaila bat euren xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioak handiak izatea da (beirazko zuntzetan erabiltzen diren ohiko

lur-arraroak dituztenak baino 10 000 aldiz handiagoak [21]), irabazi altuak oso zuntz laburretan lortzeko aukera eskaintzen digutelarik.



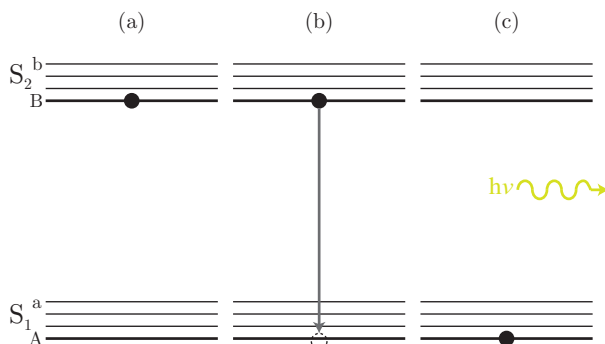
2.9 irudia: Errodamina B-ren xurgapeneko (lerro solidoa) eta igorpeneko (lerro marratua) gurutze-sekzioen espektroak PMMA materialean [16].

2.3.1 Berezko Igorpena

Sistema-arteko pasagunea mesprezatu ostean, edozein elektroi S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenetik oinarritzko egoerara bueltatuko da, berezko igorpenaren edo igorpen estimulatua bitartez. 2.10 irudian ikus daitekeen bezala, berezko igorpen prozesuan, S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean dagoen elektroia oinarritzko egoerara espontaneoki erlaxatzen da (inolako kanpo eraginik gabe), fotoi bat igorritik (fluoreszentzia). Igorritako fotoiaren uhin-luzera eta baita propagazio noranzkoa ere ausazkoak dira. Beste alde batetik, uhin-luzera bakoitzaren probabilitatea igorpeneko gurutze-sekzioak determinatuko du:

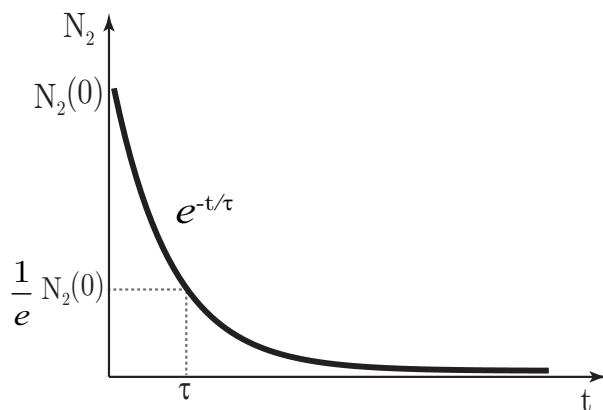
$$P(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma_{emi}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \sigma_{emi}(\lambda) d\lambda} \quad (2.7)$$

non $P(\lambda_1, \lambda_2)$ espontaneoki igorritako fotoi bat λ_1 eta λ_2 uhin-luzera tartean egoteko probabilitatea adierazten duen. Honek, espontaneoki igorritako fotoi gehiago igorpeneko gurutze-sekzioaren maximoaren inguruan kokaturik egongo direla esan nahi du. Beste aldetik, igorritako fotoiak zuntz optiko baten barruan sortu direnez, igorpen horien β frakzioa bakarrik hedatu ahalko da gidaturiko noranzkoan zuntzaren bukaeraraino. Parametro hau hurrengo kapitulu sakonago ikasiko den arren, aurrean dezakegu β parametroa angelu kritikoak definituriko konotik kalkula daitekeela.



2.10 irudia: Fotoi baten berezko igorpena. a) Elektroia S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean. b) Erradiaziozko berezko desintegrazioa oinarritzko egoerara. c) Elektroia oinarritzko egoeran, fotoi bat igorri ostean.

Inolako kanpo-eraginik gabe elektroia bat egoera kitzikatuan mantenduko den denbora, oinarritzko egoerara desintegratu gabe, *fluoreszentzia-erdibizitza* τ parametroaren bitartez karakterizatzen da. Fluoreszentzia-erdibizitza, hasiera batean kitzikatutako egoeran dauden molekula sorta baten berezko igorpenaren batez besteko iraupena da. Bereziki, 2.11 irudian ikus daitekeen bezala, hasierako momentuan kitzikatutako egoeran dauden molekulen kopurutik $1/e$ frakzioa edukitzeko pasa behar den denbora zein den adierazten du τ parametroak. Ondoz ondoko τ denbora tartean ostean, kitzikatutako egoeran geratzen diren molekulen kopurua $1/e$ aldiz txikiagoa da. Fluoreszentzia-erdibizitza kontsideraturiko dopante organikoarekin edo polimero konjokatuarekin erlazionaturik dago. Hala eta guztiz ere, τ nanosegundoen ordenan kokatzen da tesi-lan honetan erabilitako dopanteentzat [16],[22].



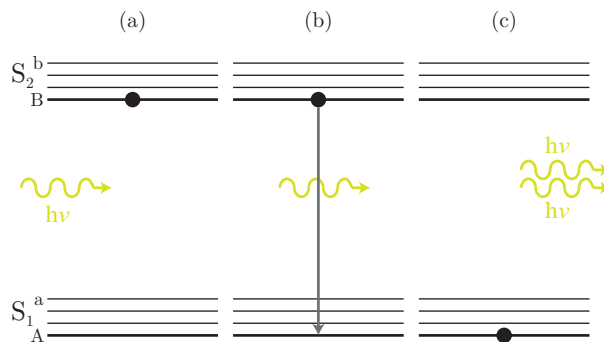
2.11 irudia: Berezko igorpenaren ondoriozko S_2 bibrazio azpi-mailako populazioaren eboluzio esponenzial beherakorra τ erdibizitza-erdiaren bitartez.

Fluoreszentzia-fotoietan bilakaturiko ponpaketa-fotoien frakzioari *fluoreszentziaren efizientzia-kuantikoa* ϕ (ingelesez *quantum yield of fluorescence*) bezala ezagutzen da. Bere balio maximo posiblea 1 da, kitzikaturiko molekula guztiak oinarrizko egoerara fotoi bat igorri bueltatzen direla adierazten duela.

2.3.2 Igorpen Estimulatua

Berezko igorpenaz gain, kitzikaturiko edozein molekula oinarrizko egoerara igorpen estimulatuen bitartez ere buelta daiteke, fotoi erasotzaile baten eraginaren ondorioz. Prozesu hau azaltzeko asmoz, kitzikaturiko molekulen populazio jakin bat kontsideratuko dugu, 2.12 irudian ikus daitekeen bezala. Energia egokia duen fotoi batek eta S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean kokatzen den elektroia batek elkar eragiten badiote, elektroia S_1 oinarrizko egoeraino estimulatua izan daiteke, hazi bezala erabilitako fotoi erasotzailearen uhin-luzera, noranzko eta energia berarekin. Kitzikaturik dagoen molekulak igorpen estimulatua edukitzeko, fotoi erasotzailearen energia eta molekularen baimendutako trantsizio-energia berdinak izan behar dute.

Populazio gehien daukan egoeraren arabera, xurgapen ala igorpen garbia izango dugu. Xurgapen prozesua nagusia izateko, molekula gehiago egon beharko dira oinarrizko egoeran. Populazio-inbertsioa baldin badago, hau da, molekula kopuru handiagoa kitzikaturiko egoeran baldin badago, orduan, igorpen estimulatua izango da dominatzailea.



2.12 irudia: Fotoi baten igorpen estimulatua. a) Elektroia bat S_2 -ren bibrazio azpi-maila baxuenean. b) Fotoi erasotzaile batek bigarren fotoi baten igorpena estimulatzen du, lehenengo fotoiaren fasean eta energia berarekin. c) Estimulatutako fotoia oinarrizko egoeran dago, fotoi originalaren amplifikazio koherentea gertatu delarik.

Ikus dezagun ia giro-tenperaturan populazio-inbertsioa gertatzea posiblea den. S_1 eta S_2 egoeretako populazioen arteko tasa ondorengoa da:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right)} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (2.8)$$

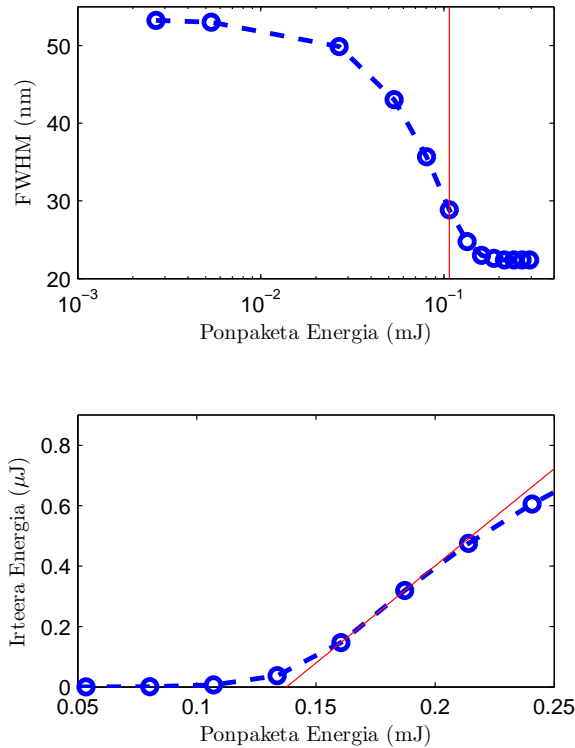
non aldagaiak honako hauek diren: E_2 kitzikaturiko egoeraren energia, E_1 oinarritzko egoeraren energia, N_i egoera bakoitzeko molekulen zenbakia, k Boltzmann-en zenbakia eta T temperatura. T giro-tenperatura (hots, $kT = 2.15 \cdot 10^{-2}$ eV) eta $E_2 \geq E_1$ diren heinean, populazio-tasa unitatea baino baxuagoa izaten da normalean. Orokorrean, kanpo-ponpaketarik gabe, kitzikatuko populazioa oinarritzko egoerakoarena baino txikiagoa izaten da. Bi populazioen kopurua berdina izateko tenperatura infinitu izan beharko litzateke. Dopante molekulak kitzikatzeko metodo posible bat argi bidez ponpatzea da, hain zuzen ere, kitzikapen eta oinarritzko egoeren gap energetikoa duen argiaren bitartez.

2.3.3 Berezko Igorpen Anplifikatua

Kitzikaturiko egoeran dauden molekulen populazioa nahiko altua izatea lortzen baldin badugu, espontaneoki igorritako molekula baten fotoiak, bere hedapen bidean dauden kitzikaturiko molekulak aurkitzean fotoi gehiago sortaraziko ditu igorpen estimulatuaeren ondorioz. Efektu hau laser-igorpenaren aitzineko prozesua da eta laser-antzeko *berezko igorpen amplifikatua* (ingelesez *Amplified Spontaneous Emission*, edo *ASE*) bezala ezagutzen da. Benetako laser-emisioak barrunbe-optikoaren beharra badu ere, irabazi altuko materialean ASE igorpena inolako ispiludun barrunberen beharrik gabe gertatzen da [23]. ASE igorpenak laser erradiazioaren ezaugarri asko konpartitzen baditu ere (estutasun espektrala, direkzionaltasuna eta atari-energiaren existentzia), hauek ez daude hain garaturik.

Egoera kitzikatutako molekulen kopurua altua izan ezean, igorpen estimulatua gertatzeko aukerak oso urriak dira. Kasu horretan, fluoreszentzia soilik ikusiko genuke. Ponpaketa energia igotzen den heinean, eta, ondorioz, egoera kitzikatuko populazioa igotzen den heinean, igorpen estimulatua izaten hasiko ginateke. Fotoi gehienak igorpen gurutze-sekzioaren maximoaren inguruan sortuko direnez, uhin-luzera tarte horretan igorpen estimulatua eta amplifikazioa gertatzeko aukera gehiago egongo da. Era berean, xurgapen handia dagoen uhin-luzera tartean igorpen estimulatuak ez dira oso ugariak izango. Hau dela eta, xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen gainjarpenak, eta, ondorioz, Stokes desplazamenduak, ASE igorpenean eragin zuzena daukate.

PZO laginak ASE emitituko dituen uhin-luzerak dopantearen xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen arteko lehiaketaren ondorioa izango dira.



2.13 irudia: Zabalera espektralaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe (goian). Irteerako energiaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe (behean). Kurba honetatik ASE-ren ataria eta malda efizientzia kalkula daitezke. Irudi biak [25] erreferentziatik lortu dira.

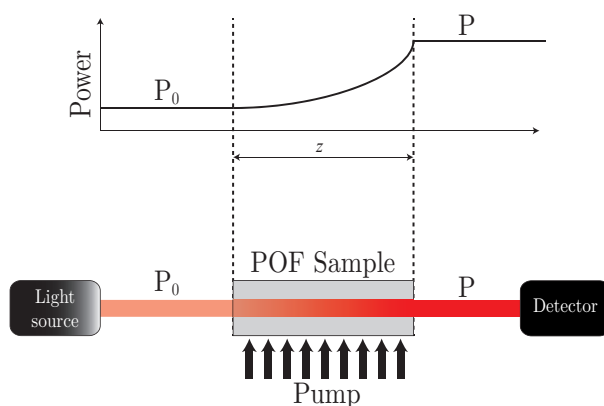
Ikertzaile batzuen aburuz, ponpaketa energia igotzean eta behin ASE-ren *atarira* (ingelesez *ASE threshold*) heltzean, igorpeneko intentsitatearen zabalera espektral totala altuera erdian (FWHM, ingelesez *Full Width at Half Maximum* bezala ezagutzen dena) erdira jaisten da, energia baxuekin duen zabalaren aldean (ikus 2.13 irudiaren goiko partea) [24]. Beste ikertzaile batzuen aburuz, ordea, ASE atariaren gaineratik zuntzaren irteerako energiak ponpaketa energiarekin menpekotasun lineala du. Bere maldari *malda efizientzia* esaten zaio eta ASE-ataria ardatz horizontalarekiko ebakidura bezala definitzen dute. 2.13 irudiaren beheko partean ikus daiteke nola kalkula daitezkeen bi parametro hauen balioak ohiko irteera-sarrera energia kurba batetik [25].

Anplifikagailu optikoen kasuan, berezko igorpena eta ASE igorpena ekidin beharreko efektuak dira, zarata-faktorea handitzen baitute. Hondo-

zarata eta fotoluminiszentziarekin batera, berezko igorpen anplifikatua zarata faktorerik nabarmenetakoena da mota honetako elementu optikoetan.

2.4 Seinale-irabazia

Xurgapen lineala azaldu dugun atalean ikusi dugun bezala, argi intentsitatea gutxiagotu egin daiteke dopaturiko PZOaren barnetik bidaiatzean. Hala eta guztiz ere, molekula dopanteen populazio inbertsioa baldin badago, igorpen estimatutaren ondoriozko irabaziak galerak gainditzen ditu, eta, ondorioz, argi intentsitatea indartu egiten da, 2.14 irudian ikus daitekeen moduan.



2.14 irudia: Seinale-irabazia optikoki ponpaturiko PZO lagin batean.

Irabazi koefizientea $\gamma(\lambda)$ laserren parametro fisikorik garrantzitsuenetako bat da. Hedapen distantzia unitateko argi potentziaren aldaketa, bezala definitzen da eta bere magnitudea alderantzizko luzera da (m^{-1}). Parametro hau positiboa izan behar da argiaren anplifikazioa gertatzeko [26].

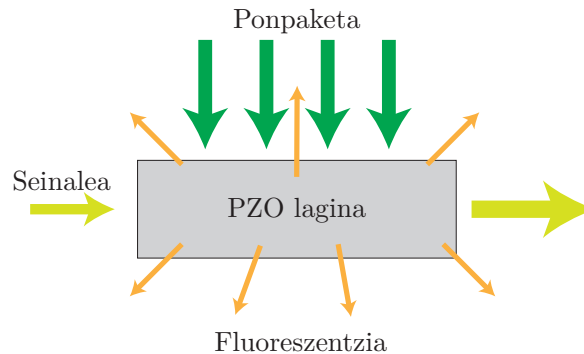
$$P = P_0 e^{\gamma(\lambda)z} \quad (2.9)$$

non

$$\gamma(\lambda) = N_2 \sigma_{emi}(\lambda) - N_1 \sigma_{abs}(\lambda) \quad (2.10)$$

Irabazi koefizientea uhin-luzerarekiko eta kitzikaturiko molekulen populazioarekiko menpekoa da. Irabazi koefizientea positiboa izateko molekula gehiago egon behar dira kitzikaturiko egoeran oinarriko egoeran baino. 2.9 Ekuazioaren arabera, argi-potentzia z propagazio-distantziarekiko esponentzialki hazten da. Hazkunde esponentzial honek ezin du etengabe jarraitu, izan

ere, potentziak infinitura joko bailuke, fisikoki erabat ezinezkoa litzatekeelarik. Energiaren kontserbazioa mantentzeko, anplifikaturiko argi-sortak ezin du ponpaketa-argiak hornitzen duen energia baino gehiago irabazi. Uneren batean, irabazia saturatzen hasiko da, kitzikaturiko egoerako eta oinarriko egoerako populazioen aldea txikiagotzen den heinean. Populazioen aldea txikiagotzearen arrazoietakoa bat igorpen estimulatuaeren prozesua da. Laser bidezko kitzikapena erabil daiteke populazio inbertsioa mantentzeko, baina beti muga zehatz batera bakarrik. Populazioen aldea txikiagotzearen ondoriozko irabaziaren mugatzeari irabaziaren saturazio-efektua esaten zaio.



2.15 irudia: Ponpaketa energia, seinale-energia handitzeko erabiltzeaz gain, beroan eta fluoreszentzian ere bilakatzen da.

Argiak populazio inbertsioa duen dopaturiko PZO batetik zehar bi-daiatzten duenean, bere intentsitatea anplifikatu egiten da. Hau da anplifikagailu optikoaren funtzionamendu oinarria. Populazio inbertsioa lortzeko laser ponpaketa bitartez irabazi-materiala kitzika daiteke, eta, ondorioz, seinalea daraman argi-sorta (telekomunikazio linea batean bezala) anplifikatu egiten da, fasea eta noranzkoa mantenduz. 2.15 irudian ikus daitezkeen bezala, ponpaketa-energia ez da populazio inbertsioa lortzeko bakarrik erabiltzen, energiaren parte bat ezinbestean fluoreszentzia (edo ASE igorpena ponpaketa energia altua denean) eta beroa bilakatuko delako. Beroan eta fluoreszentzian “galduriko” energiaren parte zenbat eta txikiagoa izan, orduan eta irabazi altuagoa lortuko dugu.

Irabazi koefizienteak argi-potentziaren aldaketa hedapen-distantzia unitateko adierazten digu, baina interesgarriagoa izango litzateke seinale-potentzia zenbat handitu den jakitea PZOzko anplifikagailu osoa zeharkatu ostean. Hau anplifikagailu baten *irabazi totalaren* bitartez (dB-tan) jakin daiteke:

$$G(\lambda) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s(\lambda)}{P_{s,0}(\lambda)} \right) \quad (2.11)$$

Ekuazio honetan, $P_{s,0}(\lambda)$ terminoa λ uhin-luzeran zentraturiko sarre-rako seinalearen potentzia da, eta $P_s(\lambda)$ terminoa λ uhin-luzeran zentraturiko zuntzaren irteerako amplifikaturiko potentzia da.

Edonola ere, zehatzagoa den irabaziaren beste definizio bat erabiltzen da normalean amplifikagailu optikoetan, *seinale-irabazia* (dB-tan) hain zuzen ere:

$$G(\lambda) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s(\lambda) - P_{ASE}(\lambda)}{P_{s,0}(\lambda)} \right) \quad (2.12)$$

Zenbakitzailea amplifikaturiko seinale-potentziaren eta berezko igorpen amplifikatuaren hondo-potentziaren arteko aldea da, amplifikaturiko seinalea agertzen den uhin-luzera tartean. Beste hitz batzuekin esanda, zenbakitzailea amplifikaturiko seinalearekin bakarrik erlazionaturik dagoen irteerako potentzia da. Aipatu beharra dago seinalearen potentzia altua denean irabazi totalak eta seinale-irabaziak bat egingo dutela.

2.5 Fotoegonkortasuna

PZOetan oinarrituriko laser eta amplifikagailuak eraikitzerako orduan laserren bitartezko kitzikapena erabiltzea ohikoa izaten da. Hala ere, intentsitate altuko ponpaketa jarraituek, dopante organiko eta polimero konjokatuen ezaugarri fisikoei eragin diezaiokete, argia emititzeko kapazitatea txikiagotuz. Dopante molekula batek bere igorpena inolako degradazio barik mantentzeko kapazitatea *fotoestabilitate* terminoarekin definitzen da [3]. Fotoestabilitateak, argi esposizioaren ondorioz, zuzeneko ala zeharkako degradazio prozesua karakterizatzen du. Alde batetik, zuzeneko prozesuan dopante molekulak kitzikatze-argiaren xurgapenaren ondorioz degradatzen dira, aldaketa kimikoak pairatzen dituztelarik. Tripete-egoera, adibidez, oso egoera errektiboa da. Oxigenoa argiaren bitartez aldaketa kimikoak errazten dituen katalizatzailea da. Oxigenoa laginetik at mantenduz gero, askoz ere motelago degradatzen dira dopante molekulak. Beste alde batetik, zeharkako prozesuan argia xurgatzean materialean paraturiko energiak laginaren tenperatura igotzen du eta honek, dopante molekulen itxuran aldaketak eragiten ditu. Ondorioz, dopante molekulak fluoreszentzia emititzeari laga diezaiokete edo eredu desberdinarekin igorri ahalko

du. Degradazio mota hau lehenengoko dopaturiko polimeroen garaitik da eza-guna [27].

Aurreko ikerketetatik ikus daiteke [15],[28]-[30] fotoegonkortasunerako garrantzitsuak diren hainbat parametro aurkitu direla dagoeneko, hala nola, temperatura, matrize ostalaria, ponpaketa potentzia eta uhin-luzera, molekula dopante mota, dopantearen kontzentrazioa eta ezpurutasunak materialean. Polimero konjokatuak PZOen nukleo solidoan txertaturik erabiltzearen abantailetakoa bat lor daitekeen fotoegonkortasun altuagoa da [3]. Hau horrela da, alde batetik, matrize solidoetan txertaturiko dopanteak prozesu fotokimikoetan parte hartzen duten ezpurutasunetatik partzialki babesturik daudelako [27], eta, beste alde batetik, PZOen estaldurak dopante molekulak oxigenotik babesten dituelako [28]. Honez gain, zuntzen geometria fin eta luzeak erlaxazio termiko ona errazten du, temperaturaren ondoriozko degradazioa txikiagotzen duelarik.

PZOetan oinarrituriko laser eta amplifikagailuetan igorpen estimulatua lortzeko, beharrezko kitzikapen intentsitatea masa-materialetan baino baxuagoa izaten da. Gertaera hau oso garrantzitsua da, izan ere, material dopanteen fotoegonkortasuna eta erdibizitza kitzikapen intentsitate altuekin txikiagotzen baitira. Beste alde batetik, aipatu beharra dago molekula dopanteen fotoegonkortasuna gutxiagotu egiten dela energia altuko fotoiekin (espektroaren alde ultramorean) kitzikatzen badira [15]. Hau horrela izanik, ikertzaile talde ugari espektroaren uhin-luzera altuagoetan lan egiten duten polimero konjokatu berrien bila dihardute lanean [29].

2.6 Ondorioak

Kapitulu honetan erdieroale organiko eta polimero konjokatuaren oinarri teorikoa azaldu da. Dopante hauek polimero-materialen malgutasun mekanikoa, erdieroale inorganikoen ezaugarri elektronikoak eta luminiszentzia gaitasunak batzen dituzte. Dopante hauen ezaugarri molekularrak azaltzeaz gain, dopante hauek argiarekin interakzionatzeko duten aukerak ere azaldu dira, hala nola, xurgapen lineala, berezko igorpena, igorpen estimulatua eta berezko igorpen amplifikatua. Honez gain, laser eta amplifikagailu optikoekin lan egiterako orduan garrantzitsuak diren hainbat parametro definitu ditugu, hala nola, galerak, xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioak, fluoreszentzia-erdibizitza, ASE-ren atari eta malda-efizientzia, irabazi koefizientea, irabazi totala eta seinale-irabazia. Azkenik, dopanteen igorpen ezaugarrietan modu jarraian kitzikatutako ponpaketa-intentsitate altuek duten eraginaren inguruko hainbat komentario egin ditugu.

Kapituluan zehar eginiko analisia erdieroale organiko eta polimero konjokatuekin dopaturiko PZOetan oinarrituriko laser eta amplifikagailuen ezaugarri optikoen eredu matematiko on bat garatzeko oso erabilgarria izango da.

2.7 Erreferentziak

- [1] A. Tagaya, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High-power and high-gain organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: Novel techniques for preparation and spectral investigation," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 3, pp. 572-578. 1997.
- [2] R. Xia, G. Heliotis, Y. Hou eta D. D. C. Bradley. "Fluorene-based conjugated polymer optical gain media," *Organ. Electron.*, vol. 4, no. 2-3, pp. 165-177. 2003.
- [3] A. Dubonis, M. Canva, A. Brun, F. Chaput eta J. P. Boilot. "Photostability of dye molecules trapped in solid matrices," *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 3193-3199. 1996.
- [4] A. J. Heeger. "Semiconducting eta metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials," *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, pp. 681-700. 2001.
- [5] A. G. McDiarmid. "Synthetic metals: A novel role for organic polymers," *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, pp. 701-712. 2001.
- [6] H. Shirakawa. "The discovery of polyacetylene film-the dawning of an era of conducting polymers," *Reviews of Modern Physics*, vol. 73, pp. 713-718. 2001.
- [7] J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. B. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns eta A. B. Holmes. "Light-emitting diodes based on conjugated polymers," *Nature*, vol. 347, pp. 539-541. 1990.
- [8] N. S. Sariciftci, "Polymeric photovoltaic materials," *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, vol. 4, pp. 373-378. 1999.
- [9] J. H. Burroughes, C. A. Jones eta R. H. Friend, "New semiconductor device physics in polymer diodes and transistors," *Nature*, vol. 335, pp. 137-141. 1988.
- [10] G. Yu, J. Wang, J. McElvain eta A. J. Heeger, "Large-Area, Full-Color Image Sensors Made with Semiconducting Polymers," *Advanced Materials*, vol. 10, pp. 1431-1434. 1998.
- [11] C. W. Tang eta S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 51, pp. 913-915. 1987.

- [12] M. Pope eta C. E. Swenberg, "Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers," Oxford University Press, USA. 1999.
- [13] N. B. Embaye, S. K. Ramini eta M. G. Kuzyk, "Mechanisms of reversible photodegradation in disperse orange 11 dye doped in PMMA polymer," *J. Chem. Phys.*, vol. 129, 054504. 2008.
- [14] J. Zubia eta J. Arrue. "Plastic optical fibres: An introduction to their technological processes and applications," *Optical Fibre Technology: Materials, Devices and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 101-140. 2001.
- [15] G. D. Peng, Z. Xiong eta P. L. Chu, "Fluorescence Decay and Recovery in Organic Dye-Doped Polymer Optical Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 12, pp. 2365-2372. 1998.
- [16] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. "Theoretical and experimental investigation of rhodamine B-doped polymer optical fibre amplifiers," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 2215-20. 1995.
- [17] N. K. M. Naga Srinivas, S. Venugopal Rao eta D. Narayana Rao. "Saturable and reverse saturable absorption of Rhodamine B in methanol and water," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 12, pp. 2470-2479. 2003.
- [18] C. Chi, Chan Im eta G. Wegner. "Lifetime determination of fluorescence and phosphorescence of a series of oligofluorenes," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 124, no. 2, pp. 024907. 2006.
- [19] A. Tagaya, T. Kobayashi, S. Nakatsuka, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High gain and high power organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: absorption and emission cross sections and gain characteristics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. 2705-2708. 1997.
- [20] M. Karimi, N. Granpayeh eta M.K. Morraveg Farshi. "Analysis and design of a dye-doped polymer optical fiber amplifier," *Appl. Phys. B*, vol. 78, pp. 387-396. 2004.
- [21] W. L. Barnes, R. I. laming, E. J. Tarbox eta P.R. Morkel. "Absorption and emission cross section of Er^{3+} doped silica fibers," *IEEE Journal of quantum electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1004-1010. 1991.
- [22] A. Charas, A. L. Mendonça, J. Clark, J. Cabanillas-Gonzalez, L. Bazzana, A. Nocivelli, G. Lanzani eta J. Morgado. "Gain and ultrafast optical switching in PMMA optical fibres and films doped with lumines-

- cent conjugated polymers and oligomers,” *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, no. 1, pp. 45-53. 2010.
- [23] I. D. W. Samuel, E. B. Namdas eta G. A. Turnbull. “How to recognize lasing,” *Nature Photonics*, vol. 3, no. 10, pp. 546-549. 2009.
- [24] R. Xia, G. Heliotis, Y. Hou eta D. D.C. Bradley. “Fluorene-based conjugated polymer optical gain media,” *Organic Electronics*, vol. 4, pp. 165-177. 2003.
- [25] I. Ayesta, J. Arrue, F. Jiménez, M. A. Illarramendi eta J. Zubia. “Computational analysis of the amplification features of active plastic optical fibers,” *Phys. Status Solidi A*, vol. 208, no. 8, pp. 1845-1848. 2011.
- [26] Mark Goossens. “Ultrafast organic lasers and solid-state amplifiers,” Ph.D. dissertation, School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, St. Andrews, Scotland. 2007.
- [27] I. Kaminow, L. Stulz, E. Chandross eta C. Pryde. “Photobleaching of organic laser dyes in solid matrices,” *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 7, pp. 1563-1567. 1972.
- [28] Y. Nishizawa, S. Nishihara, K. Kuriki, A. Tagaya eta Y. Koike. “Lasing analysis of highly efficient rhodamine 6G-doped graded-index plastic optical fiber lasers,” in *Proc. 16th Int. Plast. Opt. Fibers Conf.*, Torino, Italy, 2001, pp. 105.
- [29] U. Scherf, S. Riechel, U. Lemmer eta R. Mahrt. “Conjugated polymers: Lasing and stimulated emission,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 5, no. 2-3, pp. 143-154. 2001.
- [30] J. Jo, D. Vak, Y. Y. Noh, S. S. Kim, B. Lim eta D.Y.Kim. “Effect of photo- and thermo-oxidative degradation on the performance of hybrid photovoltaic cells with a fluorene-based copolymer and nanocrystalline TiO_2 ,” *J. Mater. Chem.*, vol. 18, no. 6, pp. 654-659. 2008.

3. Kapituluia

Sistema-eredua

Laburpena— Kapitulu honek bigarren kapituluko fenomeno fisikoak kontuan hartzen dituen dopaturiko PZOen eredu teorikoa eta konputazionala azaltzen ditu. Azalpenen artean, denboraren menpeko tasa-ekuazioak, erabilitako zuntzen ezaugarrien gure neurketak, edo, kasu batzuetan, publikaturiko neurketetatik parametro espezifikoaren gure kalkuluak; eta tasa-ekuazioak askatzeko erabilitako ad hoc algoritmoak azalduko dira.

PZOzko ispiludun laserrak, PZOzko banda-zabaleko-iturri superfluoreszenteak eta PZOzko anplifikagailuak dopante molekuletan gerta daitezkeen oinarritzko fenomeno fisikoekin ez ezik, zuntz optikoen zeharreko argiaren propagazioarekin ere oso erlazionaturik daude. Hortaz, zuntzek eta dopanteek nola funtzionatzen duten jakitea funtsezkoa izango da, bai tresna konplexuagoak garatzeko eta baita inplikaturiko fenomeno fisikoak ulertzeko ere. Adibidez, 1987. urtean hainbat industria-aplikazioen eskakizunak betetzeko lur arraroe-tan oinarrituriko zuntz-iturri superfluoreszenteak garatu ziren [1]. Gaur egun, PZO aktiboek eskaintzen dituzten aukera berriak direla eta, aplikazio berriak garatzeko ikertuak izaten ari dira. Honen ondorioz, PZOetan oinarrituriko laserren eta anplifikagailuen ikerketa sakona egitea oso garrantzitsua izango da, ikuspuntu ekonomikoaren aldetik ez ezik, ikuspuntu zientifikotik ere.

Lehendabizikoz, dopante organikoekin dopaturiko PZOen eboluzio optikoa, kualitatiboki eta kuantitatiboki, azaltzen duen gure eredu teorikoaren inplementazio numerikoa eta ekuazioak azalduko ditugu. Eredu hau akoplaturiko ekuazio diferentzialetan oinarriturik dago, eta oso baliagarria izan daiteke prototipoak eraiki baino lehenagoko diseinu-fasean, igorpen ezaugarriak konputazionalki simulatzeko. Kapitulu honek, gure ereduaz gain, beste ikertzaileek

antzeko eredua garatzeko beharrezko dituzten ezagutzak ere erakusten ditu. Beste batzuen artean honako hauek dira: hasierako eta mugalde-baldintzak; inplikaturiko parametroen eta ezaugarri optikoen balioen neurketak; ontzat har daitezkeen sinplifikazio-hipotesiak; ekuazio-multzoa ebatzi ahal izateko beharrezko algoritmo numeriko efizienteak; algoritmo horiek beharrezko egonkortasunarekin eta zehaztasunarekin exekutatzeko parametroen aukeraketa zentzuduna. Eredu konputazional hau interesgarriak izan daitezkeen parametro fisiko desberdinen arabera argi-potentziaren igorpenaren eboluzioa aztertzeko erabiliko da, bai maila-indize eta baita indize gradualeko PZOetan ere. Honek, parametro horien, zuntz mota eta dopante desberdinen eragina aztertzea ahalbidetuko digu. Lorturiko emaitzak hurrengo kapituluan zehar erakutsiko dira.

3.1 Artearen Egoera eta Helburu Orokorrak

Ereduaren azalpenekin hasi aurretik, atal honek PZO aktiboen inguruan literaturan aurki daitezkeen ikerketa teorikoak laburbiltzen ditu. PZOetan oinarrituriko lehendabiziko laser [2] eta amplifikagailu [3] optikoak garatu zirenetik, 1987 eta 1993. urteetan, hurrenez hurren, hainbat lan esperimental burutu dira, igorpen eta irabazi ezaugarriak hobetuz. Edonola ere, ezaugarri optikoak teorikoki aztertzen dituzten artikuluen kopurua erlatiboki urria da, eta, normalean, interesgarriak diren parametro fisikoen eragina erreproduzitzeko egoera oso partikularretan baino balio ez duten hurbilpenak erabiltzen dituzte. Bestalde, zerkusua daukaten ikerketa-lanek, gehienetan, beirazko zuntz optikoetan oinarrituriko laser eta amplifikagailuak jorratzen dituzte [4]-[6], eta, orokorrean, erbioa bezalako lur arraroekin dopatzen dira [7],[8]. Lan hauetan ondorioztaturiko emaitzak eta dopante organikoekin dopaturiko PZOetan lor daitezkeen emaitzak desberdinak izan daitezke, alde batetik polimerozko zuntzen ezaugarri fisiko desberdinengatik, eta, bestetik, dopante organikoen konfigurazio elektronikoko desberdinagatik.

PZOen energia egoeretako populazio dentsitateen (molekulak bolumen unitateko) eta potentzia optikoen dinamikak modelizatzeko, normalean, laserren tasa-ekuazioetan oinarrituriko sistema bat erabiltzen da. Sistema fisikoa deribatu partzialetako ekuazio multzo baten bitartez deskribatzen da, akoplaturik dauden ekuazioen bitartez, hain zuzen ere. Izan ere, ekuazio hauek menpeko aldagaiak dituzte eta baita bigarren kapituluan ikusitako prozesu desberdinen ondoriozko termino akoplatuak ere. Kasurik sinpleenentzat, populazio dentsitateen egoera egonkorrak analitikoki kalkulatzeko posiblea izango litzateke [7]-[9]. Edonola ere, kasurik gehienetan, tasa-ekuazioak eredu numeriko zeha-

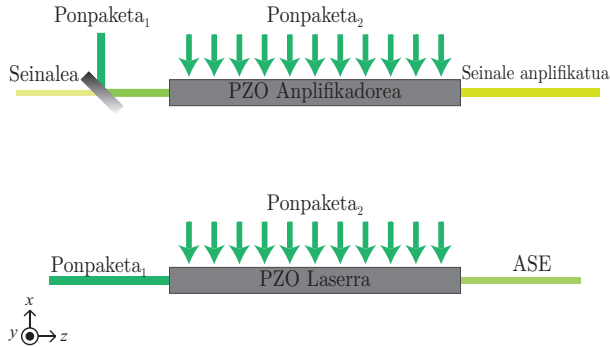
tzagoen bitartez ebazten dira [10],[11], laser eta anplifikagailu optiko pultsatuen ezagutza kualitatibo eta kuantitatiboan sakontzeko.

Orain arte, metodo numerikoen bitartez egindako ikerketa teorikoetan erabilitako aldagai independenteak, denbora t eta zuntzaren simetria ardatzean zeharreko posizioa z izan dira, baina ez uhin-luzera [12],[13]. Honez gain, ikerketa gehienetan igorpen ezaugarrien kalkulurako konfiguraziorik erabiliena ponpaketa-argia zuntzaren muturretik injektaturikoa (luzetarako kitzikapena) izan dela ikus daiteke, nahiz eta zeharkako kitzikapen konfigurazioan oinarrituriko lan esperimentalak ere badauden [14]-[16]. Aurkituriko gabeziak betetzeko, eta simulazio kapazitate osagarriak eskain ditzakeen implementazioa lortzeko, tesi-lan honetan zehar ikerketa teoriko sakona egin dugu. Adibide gisa, lan honen berritasunetako bat, t eta z aldagaiez gain, uhin-luzera λ ere aldagai independente bezala kontsideratzea izan da. Honek, fenomeno espektralaren simulazio konputazionalak egitea ahalbidetzez gain, potentzia-analisiak egitea ere ahalbidetzen digu. Gure eredu konputazionala kitzikapen konfigurazio biak (luzetarakoa eta zeharkakoa) simulatzeko kapaz ere bada, bai maila-indize eta baita indize gradualeko PZOetan ere.

3.2 Tasa-ekuazioak

Tesi lan honen helburu partzialetako bat PZOzko laser eta anplifikagailuen ezaugarri optikoak egokiro deskribatzeko gai den eredu matematiko sinplea eta trinkoa garatzea da. Alde batetik, anplifikazioan eragina duten parametro fisikoak ikastea ahalbidetuko digu. Bestetik, anplifikazio fenomeno globalean eragina duten prozesu desberdinak ulertzeko gai izango gara, erabateko interpretazio fisikoaren bitartez. Ohartu emaitza esperimental eta konputazionalen arteko konparaketak, eredu teorikoa eta kontsideraturiko sinplifikazioak balioztatzeko balioko digula.

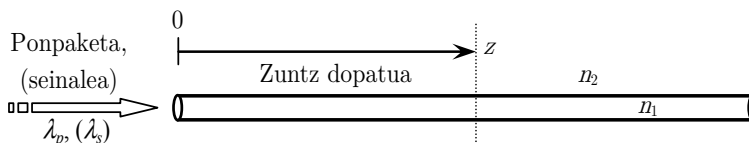
Dopaturiko PZOak sistema fisiko konplexuak direnez, erabilerraza den eredu teorikoa garatzeko hainbat sinplifikazio kontuan hartu behar dira. Hurrengo paragrafoen helburua kontsideraturiko sinplifikazioen berri ematea da, tasa-ekuazioak azaldu aurretik.



3.1 irudia: PZOzko amplifikagailuen (goian) eta laserren (behean) kitzikapena.

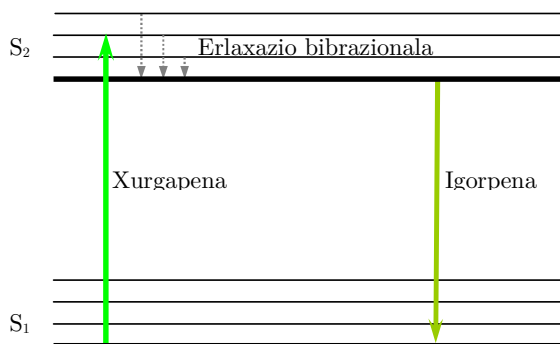
Dopaturiko PZOak laser, ASE igorle edo amplifikagailu bezala erabiltzen direnean, material-aktiboa optikoki ponpatzea beharrezkoa da, zuntzaren luzeran zeharreko dopante molekulen egoera energetiko kitzikatua populatzeko asmoz. 3.1 irudian ikus daitekeen bezala, aplikazioaren arabera, PZOak luzetara (“Ponpaketa₁”) ala zeharka (“Ponpaketa₂”) kitzika daitezke. PZOzko amplifikagailuen kasuan, zeharkako kitzikapena ispilu dikroikoak erabiltzea lor daiteke. Guk garaturiko sistema-eredua kitzikapen eskema biek lan egiteko diseinaturik dagoen arren, azalpenak sinplifikatzearren, luzetarako kitzikapenaren kasuan (“Ponpaketa₁”) jarriko dugu arreta.

3.2 irudian ikus daitekeen bezala, ponpaketaren hedapenaren noranzkoan hartu da z ardatza. Ponpaketak egiten duen noranzko berean hedatzen den edozein potentzia ko-propagantea dela kontsideratuko dugu eta kontrako noranzkoan hedatzen den edozein potentzia kontra-propagantea. Gure erudian kontsideraturiko sinplifikazioetako bat argiaren kontra-propagaziorik kontutan ez hartzea izan da. Sinplifikazio hipotesi hau zentzuzkoa dirudi, izan ere, kontra-propagazioak sortzen duen argi-potentzia ko-propagantea askoz ere gutxiagoa izango delako [1],[17]. Beste autore batzuek ere sinplifikazio bera erabiltzen dute [12]. Honez gain, 4. Kapituluan ikus daitekeen moduan, sinplifikazio hau kontuan hartuta lorturiko emaitza numerikoek bat egiten dute eskuragarri dauden hainbat emaitza esperimentalekin.



3.2 irudia: Argiaren hedapenaren eskema z noranzkoan, eta luzetara kitzikaturiko PZO aktiboen zeharreko argi-potentziaren $P(t,z,\lambda)$ kalkulurako koordinatuen jatorria.

Dopatu gabeko zuntzen (pasiboak) kasuan bezala, dopaturiko zuntzen hedapen ezaugarriak, zuntzen errefrakzio indizeen eta ezaugarri geometrikoen bidez baldintzaturik egongo dira. Bestalde, zuntzaren zeharreko puntu guztietan z simetria axiala dagoela kontsideratuko da eta ez da azimut-koordinaturik erabili ekuazioetan [1],[18]-[20]. Indize gradualeko zuntzetan ere erabil daiteke esandakoa, nahiz eta zuntz mota hauen errefrakzio indizea r distantzia erradialarekin aldatu. Mota honetako zuntzetan, errefrakzio indizea eta argi-potentziaren dentsitatea handiagoak dira zuntzaren simetria ardatzean, baita dopante kontzentrazioa ere. Izan ere, dopante aktiboak zuntzaren nukleoan atxikitze erabilitako tekniken ondorioz, zuntzaren simetria ardatzean molekula kontzentrazio altuagoa izatea lortzen da. Hau horrela izanik, indize gradualeko zuntzetan, bai argia, eta baita dopante aktiboa ere, batez bestekoa baino kontzentratuagoak daude eskualde berean. Ondorioz, argiaren eta dopantearen arteko interakzioak erraztu egiten dira. Efektu hau gure ekuazioetan kontuan hartzeko, 1 baino handiago den γ teilakatzeko-faktorearen bitartez egingo dugu. Maila-indizeko zuntzetan $\gamma = 1$, izan ere, argi-potentziaren dentsitatea zuntzaren gurutze-sekzioan uniforme da (dopantearen edo argiaren distribuzioetako bat konstantea denean $\gamma = 1$ izango da). Jo B eranskinera azalpen gehiago nahi izanez gero.



3.3 irudia: Dopante organiko eta polimero konjokatuen xurgapen eta igorpen prozesuen erantzuleak diren energia mailak.

Dopante molekula guztiek modu berean lan egiten dutela kontsideratu da. Kontsiderazio hau betetzen da baldin eta fabrikazio prozesuan dopante molekulen agregatuak sortzen ez badira. Kasu horretan, molekula isolatuen aldean, molekula-agregatuek xurgapen eta igorpen ezaugarri desberdinak izan ditzakete, eta, ondorioz, ereduak modu desberdin batean erabili beharko lirateke. Esandakoa kontuan hartzen duen ereduak dagoeneko existitzen diren arren [1], askoz ere konplexuagoak dira eta, kasurik gehienetan, esperimentalki neurtzeko zailak diren parametro askoren beharra eskatzen dute.

Honez gain, gure ereduak ez du PZO aktiboen dispertsio modala kontutan hartzen. Hurbilketa hau zentzuzkoa da, erabilitako zuntzak oso laburrak baitira (metro bat baino laburragoak).

Azkenik, bigarren kapituluan azaldu dugun bezala, dopante organiko eta polimero konjokatuen energia-diagrama energia-maila bi dituen sistema batera sinplifika daiteke (ikus 3.3 irudia). Fotoien igorpena, S_2 mailaren azpi-maila baxuenaren eta S_1 oinarrizko mailaren azpi-mailaren baten artean gertatzen da, eta fotoi-xurgapena, S_1 -en azpi-maila baxuenaren eta S_2 -ren azpi-mailaren baten artean gertatzen da. Ondorioz, dopaturiko zuntzen ezaugarri optikoak bi energia-mailen arteko denboraren menpeko tasa-ekuazioen bitartez aztertzen dira normalean. Zehatzagoak izateko, determinatu beharreko funtzio ezezagunak $P(t,z,\lambda)$ (denbora, posizioa eta uhin-luzeraren menpeko argi-potentzia) eta $N_2(t,z)$ (denbora eta posizioaren menpeko populazio elektronikoa kitzikaturiko egoeran) dira. Aldagai espazial independente bakarra zuntzaren simetria ardatzean zeharreko posizioa z da, zuntzaren luzerarekin alderaturik, bere gurutze-sekzioa askoz ere txikiagoa delako. Indize gradualeko zuntzen kasuan ere, hau da, simetria erradialarekiko zuntzaren ezaugarriak aldatzen direnean, γ zuzenketa-faktorea kalkula eta erabil daiteke aldagai espazial bakararekin lan egiten jarraitu ahal izateko. Kotsideraturiko gainontzeko aldagai independenteak denbora t eta uhin-luzera λ dira. Xedea argi-potentziaren analisi espektrala egitea denean, uhin-luzerarekiko duen menpekotasuna kontuan hartu behar da. Menpekotasun hau sartzeko, uhin-luzerarekiko menpekoak diren dopantearen xurgapen eta igorpen gurutze-sekzioak $\sigma_{abs}(\lambda)$ eta $\sigma_{emi}(\lambda)$ erabili ditugu, interesgarria den uhin-luzera tartea λ_k uhin-luzeratan zentratu-riko azpi-tarteetan banatu dugularik. Metodo honek $N_2 = N_2(t,z)$ kontsideratzea ahalbidetzen digu (hau da, bi dimentsiotako arraya). Hau horrela izanik, igorpen uhin-luzerak, igorpen gurutze-sekzioarekiko $\sigma_{emi}(\lambda)$ haztaturik daude, eta, ondorioz, sortutako argi-potentziaren espektroa honen proportzionala izango da. Igorpen estimatuentzako gurutze-sekzioa (m^2 unitateetan adierazita), ekuazioetan P , N_2 eta γ -rekin biderkatua agertzen da, baina berezko igorpenentzako terminoan gurutze-sekzio adimentsionala agertzen da. Azken honek berezko igorpenaren probabilitatea adierazten du, λ_k uhin-luzeran zentratu-riko azpi-tarte bakoitzean. Igorpen estimatuen gurutze-sekzioaren itxura erlatibo bera du. Trantsizio espontaneorik ez dagoenez kitzikaturiko energia mailaraino, xurgapen gurutze-sekzio bakarra P eta N_1 biderkatzen duen ohioa da (m^2 unitateetan adierazita).

Bolumen unitateko molekula dopatzaileen kontzentrazio totala N denborarekiko independentea da, eta, beraz, $N_1(t,z) = N - N_2(t,z)$ erlazioa kontuan hartzea posiblea izango da, non, N_1 eta N_2 , hurrenez hurren, oinarrizko egoerako eta kitzikaturiko egoerako populazio elektronikoa adierazten duten.

Argi-potentzia zuntzaren zeharreko edozein puntutan z , edozein momentutan t , eta edozein uhin-luzeraren λ menpe ebaluatzeko, beharrezko deribatu partzialetako ekuazio nagusiak hurrengoak dira [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_2}{\partial t} = & \frac{-N_2}{\tau} - \left(\frac{\sigma_{emi}(\lambda_k) N_2}{h(c/\lambda_k) A_{core}} \right) P\gamma \\ & + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right) P_p \gamma + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_k) N_1}{h(c/\lambda_k) A_{core}} \right) P\gamma \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \sigma_{emi}(\lambda_k) N_2 P \gamma - \sigma_{abs}(\lambda_k) N_1 P \gamma - \frac{1}{v_z} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{N_2}{\tau} \left(h \frac{c}{\lambda_k} \right) \sigma_{sp}^e(\lambda_k) \beta A_{core} \quad (3.2)$$

non P_p ponpaketa-potentzia den; v_z argiaren abiadura medioan (nukleoko errefrakzio indizearen menpekoea da), c argiaren abiadura hutsean, h Planck-en konstantea, τ fluoreszentsia-erdibizitza eta A_{core} zuntz-nukleoaren gurutzesezioa. γ -ren balio zehatza 1 eta 2 artekoa izaten da ohiko argi distribuzio erradiala duten IG PZOetan, baina, edonola ere, ad hoc preparaturiko zuntzetan balio hau handiagoa izatea lor daiteke, argi-potentziaren distribuzioa eta dopantearen distribuzioa zuntzaren simetria ardatzetik oso gertu kontzentratuz gero. β parametroa anplifikazio prozesuan ekarpenak egiten dituen igorpen espontaneoen frakzioa da eta propagazio-noranzko-gidatu positiboan (z^+) hedatzen diren igorpen horien potentzien frakzioa bezala kalkulatzen da. Parametro honen kalkulurako beharrezko azalpenen xehetasunak atal honetan zehar emango dira.

Eredua ponpaketa-potentziaren distribuzioarekin eta mugaldebaldintzekin osatu behar da. Luzetarako kitzikapenaren kasuan, zuntzaren simetria ardatzaren zeharreko noranzkoan (λ_p uhin-luzeran) argi-potentziaren distribuzioa deskribatzen duen ekuazioa hurrengoa da:

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1 P_p \gamma - \frac{1}{v_z} \frac{\partial P_p}{\partial t} \quad (3.3)$$

Zeharkako kitzikapenaren kasuan, ponpaketa-potentzia partzialki xurgatzen dela kontsideratu beharko genuke, izan ere, argiak zuntzaren nukleoaren diametroaren d antzeko ibilbidea zeharkatzen du, xurgapen-koefiziente eraginkorra $\alpha = N_1 \sigma_{abs}(\lambda_p)$ izanik. Zeharkako kitzikapenarekin argizaturiko eskualdean, zuntzaren barneko ponpaketa potentzia, hurrengo espresioaren bitartez kalkulatu beharko litzateke ponpaketa-pultsuaren une bakoitzarentzat.

$$P_p = P_{p,incident} (1 - e^{-d\alpha}) \quad (3.4)$$

non $P_{p,incident}$ pulstu erasotzailearen potentzia den.

Laser eta anplifikagailuetan (3.1) eta (3.2) ekuazioak argi-anplifikazioaren tasa-ekuazioak dira. Hurrengo lerroen helburua kitzikaturiko egoerako N_2 -ren denborarekiko aldaketen berri ematea izango da. Horretarako, S_2 egoerara kitzikaturiko eta S_2 egoeratik eroritako denbora unitateko molekulen kopurua modelatuko dugu. Lehendabizikoz, ponpaketa potentzia batek S_2 egoerara zenbat molekula gehitzen dituen denbora unitateko aurkituko dugu. Horretarako, ponpaketa potentzia horretan dagoen fotoi kopurua denbora unitateko eta fotoi bakar batek molekula bat kitzikatzeko duen probabilitatea hartu ditugu kontuan. Kalkuluak ponpaketaren uhin-luzeran egin dira. Fotoien potentziaren eta energiaren (E_{photon}) arteko zatiketarik, denbora unitateko fotoi kopurua kalkula daiteke, honela:

$$\frac{\text{fotoi kopurua @ } \lambda_p}{\text{denbora unitatea}} = \frac{P_p}{E_{photon}} = \frac{P_p}{h\nu_p} = \frac{P_p}{h(c/\lambda_p)} \quad (3.5)$$

Zuntz optikoaren nukleoa soilik kitzika daitekeela kontsideratu dugu, estaldura dopatu gabe dagoelako. Aurreko espresioa zuntz optikoaren nukleogurutze-sekzioarekin zatituz gero, area horretako fotoi-dentsitatea lortzen da:

$$\frac{\text{nukleoko fotoi dentsitatea}}{\text{denbora unitatea}} = \frac{P_p}{h(c/\lambda_p)A_{core}} \quad (3.6)$$

Zuntzaren nukleoko molekula bakoitzak kitzikatua izateko probabilitate konkretu bat dauka, xurgapen gurutze-sekzio $\sigma_{abs}(\lambda_p)$ eta denbora unitateko nukleoko fotoi dentsitatearen arteko biderkaduraren bitartez emanik datorrena. Beraz, denbora unitateko kitzikapen probabilitatea, ponpaketa-tasa bezala ere ezagutzen dena, hurrengo modu honetan kalkula daiteke:

$$\text{ponpaketa tasa} = \frac{\text{molekula kitzikatzeko probabilitatea}}{\text{denbora unitatea}} = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)P_p}{h(c/\lambda_p)A_{core}} \quad (3.7)$$

Beste alde batetik, xurgapen eta igorpen gurutze-sekzioen teilakatzearen ondorioz, igorpen prozesuan igorritako hainbat fotoi (dopanteak xurgatzen duen edozein λ_k uhin-luzeratan) oinarritzko egoeran dauden molekulen bitartez

birxurgatuak izan daitezke, eta, ondorioz, kitzikaturiko egoeran dauden molekula kopurua igo egiten da. Faktore honi birxurgapen-tasa deituko diogu:

$$\text{birxurgapen-tasa} = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_k)P}{h(c/\lambda_k)A_{core}} \quad (3.8)$$

Azkenik, (3.7) eta (3.8) ekuazioen gehiketarik, oinarrizko egoerako molekula dentsitatearekin (N_1) biderkatuz gero, S_2 egoerara kitzikaturiko molekulen kopuru totala denbora unitateko lortuko dugu:

$$\frac{\text{kitzikaturiko molekula kopurua}}{\text{denbora unitatea}} = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)N_1P_p}{h(c/\lambda_p)A_{core}} + \frac{\sigma_{abs}(\lambda_k)N_1P}{h(c/\lambda_k)A_{core}} \quad (3.9)$$

Orokorrean, birxurgapen-tasa ponpaketa-tasa baino askoz txikiagoa izaten ohi da, alde batetik P P_p baino hainbat magnitude-ordena txikiagoa izaten delako, eta, bestetik, ponpaketaren uhin-luzera xurgapen gurutze-sekzioaren balio altuetan kokatzen delako.

Kitzikaturiko molekula kopuruaz gain, S_2 mailatik igorpen estimulatua ondu eroritako molekulen kopurua ere kontuan hartu beharko genuke, non igorpen probabilitatea igorpen gurutze-sekzioaren bitartez emanik dagoen $\sigma_{emi}(\lambda_k)$. Birxurgapenean erabilitako arrazanamendu berdina erabilia, baina igorpen estimulatua kontuan harturik, hurrengo espresiora heltzen gara:

$$\text{igorpen estimulatu tasa} = \frac{\sigma_{emi}(\lambda_k)P}{h(c/\lambda_k)A_{core}} \quad (3.10)$$

Igorpen estimulatuaz gain, igorpen espontaneoak ere laguntzen du egoera kitzikatuko populazioaren hustuketan. Igorpen espontaneoaren tasa fluoreszentzia-erdibizitzaren alderantzizkoa bezala definitzen da:

$$\text{Igorpen espontaneo tasa} = \frac{1}{\tau} \quad (3.11)$$

(3.10) eta (3.11) ekuazioen gehiketarik, egoera kitzikatuko molekula dentsitatearekin (N_2) biderkatuz gero, S_2 egoeratik kendutako molekula kopuru totala denbora unitateko lortuko dugu:

$$\frac{\text{kendutako molekula kopurua}}{\text{denbora unitatea}} = \frac{N_2}{\tau} + \frac{\sigma_{emi}(\lambda_k)N_2P}{h(c/\lambda_k)A_{core}} \quad (3.12)$$

Puntu honetara helduta, N_2 -ren aldaketa denborarekiko defini deza-kegu, (3.1) ekuazioan ikus daitekeen bezala. Eskuma-aldeko lehen terminoak igorpen espontaneoak adierazten du, bigarren terminoa igorpen estimulatuekin erlazionaturik dago eta azkenen bi terminoak, hurrenez hurren, P_p fotoien (ponpaketaren bidezko kitzikapena) eta P (birxurgapena) fotoien xurgapenekin erlazionaturik daude. P edo P_p , N_1 edo N_2 -rekin biderkatuta agertzen den termino bakoitzean γ gainjarpen-faktorea sartu dugu. Atal honetan zehar faktore honen inguruko azalpen gehiago emango ditugu.

(3.2) ekuazioak P -ren eboluzioa adierazten du λ_x -n oinarrituriko uhin-luzera azpi-tarteetan. Ekuazio honetako termino gehienak (3.1) ekuaziokoekin erlazionaturik daude. Eskuma-aldeko lehen terminoa fotoi erasotzaileen igorpen estimulatuekin erlazionaturik dago. Bigarren terminoa, materialaren xurgapenaren ondoriozko atenuazioa adierazten du. Anplifikazio-konfigurazioan, termino hori (seinalearen uhin-luzeran) baxua izatera beharturik gaude: izan ere, termino honen balio altu batek seinale-fotoi askoren xurgapena ekarriko baiduke. Hirugarren terminoa, zuntzan zehar v_z abiadurarekin hedatzen den potentziaren propagazioa da. Igorpen espontaneoarekin erlazionaturiko laugarren terminoan, $\sigma_{sp}^e(\lambda_k)$ igorpen mota honen gurutze-sekzioa da. ASE-ataritik gora, termino hau, igorpen estimulatuen terminoa baino askoz ere txikiagoa izaten da. Edonola ere, laugarren terminoa ezinbestekoa da laserren lehen fotoiak sortzeko.

(3.3) eta (3.4) ekuazioek kitzikapen baldintza bakoitzean ponpaketa argiaren eboluzioa adierazten dute. (3.3) ekuazioko eskuma aldeko lehen terminoa ponpaketaren xurgapena adierazten du. Oinarrizko egoerako molekula bakoitzak, bere albotik pasatzen den ponpaketa fotoiren bat xurgatzeko azalera efektiboa du, hots, $\sigma_{abs}(\lambda_p)$. Hau oinarrizko egoerako molekula dentsitatearekin (N_1) biderkatuz gero, zuntzaren luzera unitateko kitzikaturiko molekula kopuru totala adierazten duen espresiora helduko gara. Espresio hau materialaren xurgapen koefizientea da: α_p (m^{-1}), λ_p kitzikapen uhin-luzeran. Ponpaketaren helburua molekula dopanteak kitzikatzea denez, α_p -ren balio altua izatea desiragarria da. Ohartu α_p ez dela konstantea zuntzaren luzeran zehar, $\alpha_p = \sigma_{abs}(\lambda_p) N_1(t, z)$ denez ponpaketa potentziak ez duelako z -rekiko esponentzial beharakor zehatza jarraitzen. Beste alde batetik, (3.3) ekuazioko azkeneko terminoak z zeharreko ponpaketaren propagazioa v_z abiaduran adierazten du.

Guk garaturiko eredian, potentzia-dentsitate oso altuen ondorioz gerta daitezkeen xurgapen efektu ez-linealak ez dira kontuan hartu. Adibidez, aldi berean fotoi bat baino gehiago xurgatzea eta saturazio optikoaren ondoriozko xurgatze-gaitasunaren gutxitzea bezalako efektuak mesprezatu egin dira. Efektu hauek kontutan hartzeak, arestian azaldutako ekuazioak aldatu behar izatea suposatuko luke.

Hurrengo kapituluan zehar, PZOzko laser eta amplifikagailuen igorpen ezaugarrietan zuntzaren zenbakizko irekidurak (NA) duen eragina ikusiko dugu. Hau PZOzko amplifikagailuetan baino, PZOzko laserretan handiagoa dela aipatu behar da. Izan ere, ASE igorpena laserretan erabilgarria da, ez ordea seinale amplifikagailuetan. Zenbakizko irekiduraren eragina β parametroaren bitartez sartu da ekuazioetan. Fotoi espontaneoaren noranzkoa isotropikoki ausazkoa da, eta igorpen horien β frakzioa bakarrik hedatu ahalko da zuntzaren bukaeraraino gidaturiko noranzkoan. Maila-indizeko zuntzen kasuan, nukleoko eta estaldurako errefrakzio indizeak, hurrenez hurren, n_1 eta n_2 direnean, β -ren balio konstantea (3.13) ekuazioan ikus daitekeen bezala kalkula dezakegu. Indize gradualeko zuntzen kasuan, ordea, lehenik zuntzaren ardatzeko β -ren balioa kalkulatu dugu, hau da, β_0 :

$$\beta_0 = \frac{\int_0^{\theta_c} I_0 2\pi \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi I_0 2\pi \sin \theta d\theta} = \frac{1 - \cos \theta_c}{2} = \frac{n_1 - n_2}{2n_1} \approx \frac{NA_0^2}{4n_1^2} \quad (3.13)$$

non I_0 espontaneoki atomo batek igorritako argi-intentsitatea (W/sr unitateetan) den eta θ_c angelu kritiko osagarria [22]. IG zuntzen kasuan, β ez da konstantea, nukleoko errefrakzio indizea r distantzia erradialarekin txikiagotzen baita. Ondorioz, β -ren batez besteko balioa kalkulatu behar da (jo tesiaren B eranskinera).

(3.1)-(3.4) ekuazioak baliozkoak dira maila-indize eta indize gradualeko zuntzentzat. Hala eta guztiz ere, bi aldaketa nabari daude β eta γ -ren balioetan. Alde batetik, P (edo P_p), N_1 -ekin (edo N_2 -rekin) biderkatuta agertzen den termino bakoitzean γ gainjarpen-faktorea sartu behar da. IG zuntzak egiteko erabilitako ohiko fabrikazio tekniken ondorioz, dopante kopurua handiagoa da zuntzaren simetria ardatzetik hurbil, hau da, mota honetako zuntzetan argi gehiago hedatzen den leku berean. Zuntzaren simetria ardatzetik hurbil argipotentzia handiagoa izatearen arrazoia, argiak errefrakzio indize maximoko eskualdeetara tolesteko duen joera da. Hortaz, eskualde berean bai dopantearen kontzentrazio molekularra eta baita fotoien kontzentrazioa ere batez bestekoa baino handiagoak dira, eta, ondorioz, elkarri eragiteko probabilitatea ere handiagoa da. Beraz, ez da harrizkoa γ gainjarpen-faktorea 1 baino handiago izatea. Edonola ere, maila-indizeko zuntzen kasuan, dopante molekulen kontzentrazio totala N uniformeki banaturik dago distantzia erradialarekiko, eta, ondorioz, $\gamma = 1$.

Beste alde batetik, IG zuntzen kasuan, β -ren batez besteko balioa kalkulatzeko beharrezkoa da, zenbakizko irekidura r -rekin aldatzen dela kontutan hartzeko. Maila-indizeko zuntzaren kasuan, ordea, zenbakizko irekidura kons-

tantea denez, β -ren batez besteko balioa zuntzaren gurutze-sekzioarena (β_0) da (ikus 3.13 ekuazioa). Zuntz mota bakoitzarentzat, β eta γ parametroen balio ohikoak 3 I Taulan laburbildurik ikus daitezke.

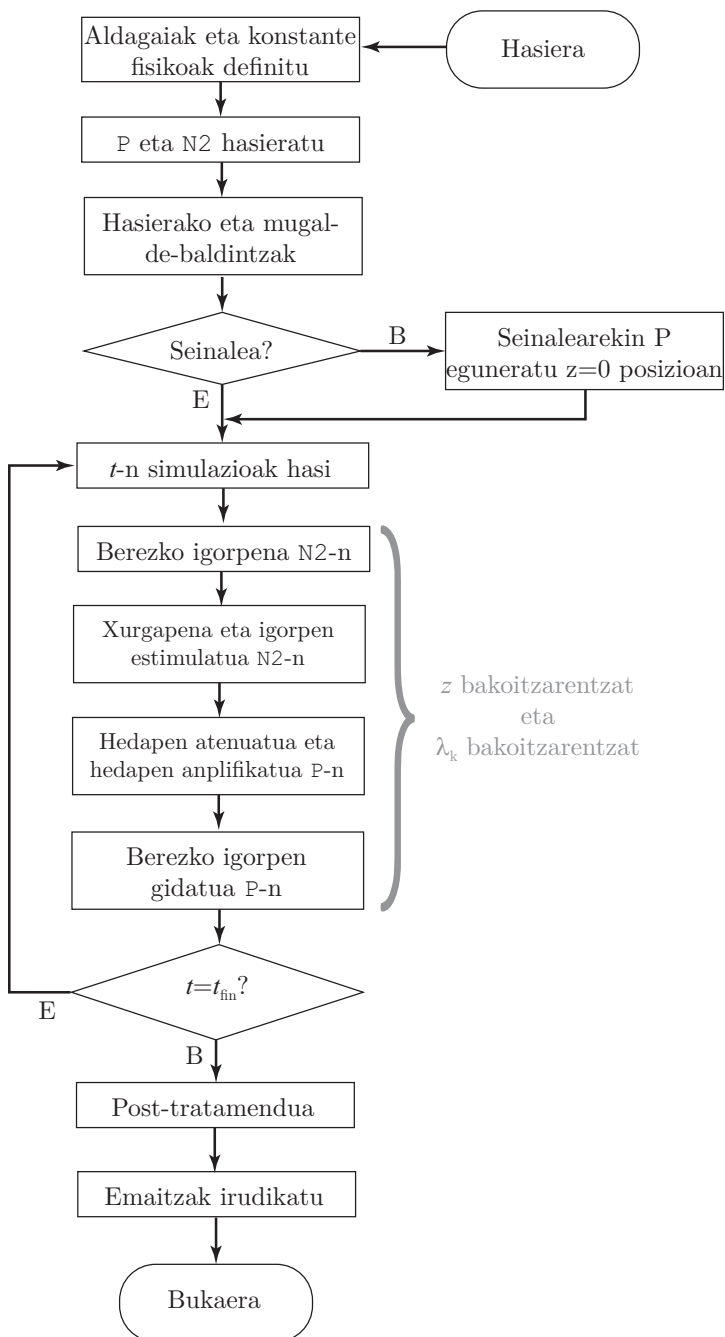
3 I TAULA: MAILA-INDIZE (MI) ETA INDIZE GRADUALEKO (IG) PZOEN β ETA γ PARAMETROEN ESPRESIO ETA VALIO OHIKOAK. INFORMAZIO GEHIAGO NAHI IZANEZ GERO JO TESIAREN B ERANSKINERA.

	Maila-Indize		Indize Graduala	
	Ekuaioa	Ohiko balioa	Ekuaioa	Ohiko balioa
β	$\frac{NA_0^2}{4n_1^2}$	0.029	$\frac{\int_0^{a_0} \beta_r(r) \theta_{nn}(r) r dr}{\int_0^{a_0} \theta_{nn}(r) r dr}$	0.02
γ	—	1	$\frac{a_0^2 \int_0^{a_0} \theta_{nn}(r) \psi_{nn}(r) r dr}{2 \int_0^{a_0} \theta_{nn}(r) r dr \int_0^{a_0} \psi_{nn}(r) r dr}$	1.43

3.3 Teknika Numerikoak eta Inplementazio-xehetasunak

Kapitulu honen hurrengo lerroen jomuga erabilitako teknika numerikoak eta inplementazio-xehetasunak azaltzea izango da. Lehentxeago aipaturiko ekuazioak ebazteko erabilitako metodo numerikoa diferentzia finituetan oinarritzen da. Zehatzagoak izateko, t , z eta λ hiru aldagaiak diskretizatu diren diferentzia finituko ad hoc algoritmoa garatu dugu.

Aurrera jarraitu aurretik, hurrengo lerroetan zehar egonkortasuna, zehaztasuna eta konputazio-kostuen inguruan jardungo dugu.



3.4 irudia: Eredu konputazionala azaltzeko fluxu-diagrama simplea.

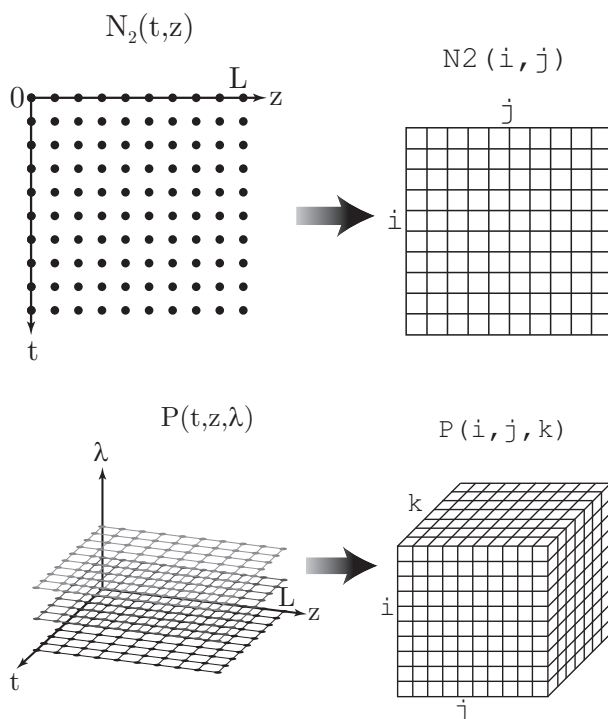
3.3.1 Egonkortasuna, Zehaztasuna eta Konputazio-Kostuei Buruzko Erronkak

Arestian aipaturiko ekuazioak desio den zehaztasunarekin ebazteko ohiko arazo biri aurre egin behar izaten zaie: memoria eskuragarritasuna (erabilitako softwarearen ondoriozko “*out of memory*” erroreak) eta algoritmo-konbergentzia. Algoritmo-konbergentzia edo egonkortasun numerikoa, sarrera-datuen erroreak nola hedatzen diren azaltzen duten algoritmo numerikoen ezaugarriak dira. Metodo egonkor batean, metaturiko erroreek egonkortzeko edo txikiagotzeko joera izaten dute. Metodo ezegonkor batean, ordea, erroreak progresiboki handiagotzen doaz, eta, ondorioz, lorturiko emaitzak guztiz onartezinak dira. Konputagailurik ahaltsuena erabilia ere, ezingo lirateke arazo hauek ekidin, kodea idazterako orduan eta parametroen aukeraketa egiterako orduan erabaki egokiak hartu ezean. Oso ad hoc teknika espezifikoak erabil daitezke algoritmo konbergentzia errazteko, edo “*out of memory*” erroreak ekiditeko. Konputazio-kostuen inguruan, hauek oso kritikoak ez direla ohartu gara. Hau dela eta, Matlab[®] bezalako maila altuko programazio lengoiaia aukeratu da, C++ bezalako lengoiaia bizkorragoak baztertuz. Adibide moduan, Matlab[®] softwarearen 7.5 bertsioa Dell Precision[™] M6400 ordenagailu eramangarrian (Intel[®] Core[™] 2 Duo Quad Core prozesagailua eta 4 GB DDR3 SDRAM 1066MHz) exekutatuz gero, emandako hasierako baldintza batzuentzat ohiko simulazio batek (hau da, z distantzia jakin batean lorturiko potentzia) minutu bat baino gutxiago iraun dezakeen arren, bilaturiko baloreak parametro baten hainbat simulazio desberdinen beharra badu (hau da, zuntzaren atari-energia), minutu franko iraun dezake.

3.3.2 Emandako Konponbideak

Gure eredu konputazionalaren fluxu-diagraman (3.4 irudia) ikus daitezkeen bezala, kodeko lehenengo pausuan simulazioak egiteko beharrezkoak diren oinarriko konstante fisikoak eta zuntzaren parametroak definitzen dira. Eredu honetako konstante fisikoak, argiaren abiadura (c) eta Planck-en konstantea (h) dira, eta beharrezko zuntz-parametroak hauek dira: nukleo eta estaldurako errefrakzio indizeak, nukleoaren erradioa, zuntzaren luzera eta γ gainjartze-faktorea. Dopante materialari erreparatuz gero, beharrezko parametroak fluo-reszentzia-erdibizitza, molekula dentsitate totala eta xurgapen eta igorpen gurutze-sekzioak dira. Hiru aldagaien (t , z eta λ) diskretizazioa pausu honetan ere defini daiteke. Aldagai espazial eta tenporalaren diskretizazioa uniformea izan da, hau da, δt eta δz urrats-tamaina finitu konstanteekin. Adibidez, δt urrats-tamaina tenporala 0.5 ns-takoa izan behar da, gutxienez, ondoz ondoko

bi puntuen artean. δz urrats-tamaina espaziala, gutxienez, 0.24 mm-takoa izan behar da eta uhin-luzera tarteen kopurua, gutxienez, 200 izan beharko da. Hiru parametro hauetarikoren bat aldatuz gero, gainontzekoak ere aldatu beharko dira, egonkortasuna galtzen ez dela ziurtatzeko. Balio maximoak Matlab[®] erabiltzean eskuragarri daukagun memoriagatik determinaturik egongo dira, programa barruan gehienezko memoria tamaina ezingo delarik gainditu. Zehaztasun egokia lortzeko aipaturiko balio minimoak erabiltzea ezinbestekoa izango da. PZOzko anplifikagailuen ezaugarrien modelizazioaren kasuan, sarrerako seinalea kokatzen den espektroaren tartea puntu kopuru minimo batekin modelatu da (adibidez 10 puntu). Zehatzagoak izateko, seinalearen espektroan finagoa den diskretizazioa erabili da.



3.5 irudia: Aldagaien biltegitratzea ordenagailu-memorian.

Deskribaturiko eskema numerikoa inplementatzerako orduan, N_2 -ren balio diskretuak biltegitratzeko $N_2(i, j)$ matrizea erabili da, non i indizea t denbora zehazteko balio duen $t_i = (i-1)\delta t$ -ren bitartez, eta j indizea z posizioa zehazteko balio duen $z_j = (j-1)\delta z$ -ren bitartez. Modu berean, 3 dimentsiotako $P(i, j, k)$ matrizea erabili da argi-potentziaren distribuzioaren balio diskretuak biltegitratzeko, non i eta j indizeak aurrekoen berdinak diren eta k

indizeak aipaturiko diskretizazio ez-uniformearen bitartez λ uhin-luzera determinatzen duen. 3.5 irudiak ilustratzen du aipaturikoa.

3.3.3 Hasierako eta Mugalde-baldintzak

Hurrengo pausuan, $\mathbb{P}(i, j, k)$ eta $\mathbb{N}2(i, j)$ matrizeen dagozkien posizioetan hasierako eta mugalde-baldintzak kokatzen dira. Matrizeen lehenengo lerroak ($i = 1$) 0-ra hasieratzen dira, ez kitzikaturiko molekularik (\mathcal{N}_2), ezta argi-potentziarik (P) ere existitzen ez diren $t = 0$ unea adierazten baitute. Hau egiaztat har dezakegu, izan ere, aurreko kapituluan adierazi dugun moduan kitzikapen ponpaketa-energiarik egon ezean, oinarrizko egoerako molekula dentsitatea kitzikaturiko egoerakoa baino askoz ere txikiagoa delako (ponpaketa potentzia 0 da $t = 0$ unean). Honen ondorioz, dopante molekula guztiak oinarrizko egoeran daudela ($\mathcal{N}_1 = \mathcal{N}$) kontsidera dezakegu, eta, beraz, kitzikaturiko egoera hutsik dagoela ($\mathcal{N}_2 = 0$). Modu berean, zuntzaren zeharreko potentzia optikoa zero dela kontsidera dezakegu $t = 0$ unean, ponpaketa potentziarik eta kitzikaturiko egoerako molekularik ez izategatik.

Mugalde-baldintzei dagokienez, ponpaketa-potentziaren pultsua funtzio Gauss-ar monokromatiko batekin deskriba daiteke:

$$P_p(z_i, t, \lambda_p) = \frac{E_p}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{peak})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.14)$$

Formulako σ zabalera efektiboa ($FWHM/2.35$) adierazten du, E_p sarre-rako pultsuaren energia da eta t_{peak} 5σ dela kontsideratu da potentzia mesprezagaria izateko $t = 0$ unean. Zeharkako kitzikapenaren kasuan, z_i -k ponpaturiko bolumena banatuta dagoen edozein xaflaren z balioa adierazten du. Aipaturiko kitzikapen pultsuaz gain, PZOzko anplifikagailuetan seinalearekin erlazionaturiko bigarren pultsu Gauss-arra gehitzen da $z = 0$ posizioan eta λ_s uhin-luzeran zentratutik. Ponpaketa pultsuaren zabalera tenporala, seinalearena baino pixka bat zabalagoa izaten ohi da [12],[23]. Hau komenigarria da, kitzikaturiko egoerako dopante molekulen populazioa aski altua izan behar delako igorpen estimulatatu ugari lortzeko, eta, ondorioz, seinale anplifikazioa. Edonola ere, pultsu Gauss-ar bien (ponpaketa eta seinalea) balio maximoak une berean gertatzen ohi dira, hau da, t_{peak} berean [12],[23]. Ponpaketa eta seinale pultsuen parametroek PZO aktiboen errendimenduan eragin handia dute. Ponpaketa pultsuaren zabalera tenporalaren eragina hurrengo kapituluan zehar ikusiko da.

3.4 irudiko fluxu diagramari so eginez, behin hasierako eta mugalde-baldintzak $\mathbb{P}(i, j, k)$ eta $\mathbb{N}2(i, j)$ matrizeen dagozkien posizioetan kokatu

ostean, begizta-nagusia exekututzen dela ikus dezakegu. Uhin-luzera diskretu bakoitzarentzat, begizta-nagusia exekutatzerakoan, ekuazioko termino bakoitza diferentzia finituen bitartez estimatzen da. Prezisio handiagoa lortzeko, diferentzia finituak, ahal den heinean, zentratu egongo dira. Lehenik eta behin, kitzikaturiko egoerako molekula dentsitatearen eta potentzia optikoaren aldatketak kalkulatu dira, (3.1) eta (3.2) ekuazioen bitartez. Aldaketa hauekin, (3.1) eta (3.2) ekuazioetako termino bakoitzaren magnitudea estimatzen da. $P(i, j, k)$ eta $N2(i, j)$ matrizeen posizio desberdinen (nodoen) balioen eguneratzearen prozesuan, ekuazio bi hauen balioak aurretik estimatu behar izaten dira. Ohikoak diren baldintzapean (ponpaketa pultsu Gauss-arra, etab.), $N_2(t, z)$ eta $P(t, z, \lambda)$ leunak izateko joera dutenez, balio ezagunak dituzten alboko hiru nodoen arteko interpolazio lineala erabili da, aipaturiko estimazioak beharrezkoak izan direnean. Hau egin ostean, bilaturiko nodo-balioa zuzendu egiten da.

Denboraren pausu bakoitzean, zuntzaren zeharreko posizioa aurreratu egiten da, eta j -ren balio guztietarako $P(i, j, k)$ eta $N2(i, j)$ matrizeak osatu egiten dira. Honek kontsideraturiko j indizearen k -ren balio guztietarako $P(i, j, k)$ matrizea betetzea dakar. Prozesua zuntzaren bukaeraraino heldu arte errepikatzen da. P eta $N2$ matrizeak lerroz lerro osatzen dira, hau da, hurrengo t -ren arteko pausuen bitartez (zutabeak hurrengo z -ren arteko pausuk dira).

Azkenik, P eta $N2$ matrizeen nodoak bete ostean, eta datuen post-tratamendua egin ostean, sistema-ereduak, bai formatu-grafikoan eta baita zenbakizko formatuan ere, datu garrantzitsuenak erakusten ditu, hala nola, zuntzaren irteerako energia-optikoa (desiotako uhin-luzeran), seinale-irabazia (seinalea egotekotan), espektroaren lehen-momentua (bataz besteko uhin-luzera adierazten du), pultsu zabalera tenporal eta espektrala, etab.

Gure sistema-ereduaren baliozkotasuna, eta, ondorioz, suposaturiko hurbilketen baliozkotasuna, geure modeloak iragarritako eta emaitza esperimentalen arteko adostasunaren bitartez determinaturik egongo da. Batzuetan, sistema-eredua gure emaitza esperimentalen bitartez egiaztatuko da, eta beste batzuetan, dagoeneko publikaturik dauden artikuluetako emaitzekin. Edonola ere, hau guzti hau hurrengo kapituluan zehar mamituko da.

3.4 Ondorioak

Kapitulu honetan zehar dopante organiko eta polimero konjokatuekin dopaturiko PZOzko laser eta anplifikagailuen ezaugarri optikoak zehaztasunez deskribatzen dituzten eredu teorikoa eta eredu konputazionala aurkeztu di-

tugu. Modelo hauek egiterako orduan bigarren kapituluan azalduko oinarri teoriko guztia kontuan hartu da.

Kapituluaren lehengo partean, argi-anplifikazioaren tasa-ekuazioetan oinarrituriko gure eredu matematikoa eta kontsideraturiko sinplifikazio hipotesiak azaldu dira. Eredu hau amplifikazio-fenomenoan zeresana duten prozesu fisiko desberdinak ulertzeko oso baliagarria izateaz gain, interesgarriak izan daitezkeen parametro fisikoen eragina aztertzeke ere balioko digu, bai maila-indize eta baita indize gradualeko zuntzen kasuan ere. Adibidez, IG zuntzen kasuan zenbakizko irekidura ez-uniformearen efektua kontuan hartu da. Honez gain, gure ereduak IG zuntzen dopante dentsitatearen eta potentzia dentsitatearen distribuzio ez-uniformeak ere kontuan hartzen ditu, γ gainjartze-faktorearen bitartez.

Kapituluaren bigarren partean, guk garaturiko ad hoc eredu konputazionala azaldu dugu. Ereduan erabilitako aldagai independenteak hiru izan dira: denbora t , posizioa z eta uhin-luzera λ . Dakigunaren neurrian, PZO aktiboak ikertzeko uhin-luzera aldagai independente moduan erabili izan den lehengo aldia da hau. Honek, igorpen ezaugarrien azterketa espektral berriak egiteko atea irekitzen digu.

Azkenik, kapituluan azalduko ereduak interesgarriak diren parametro fisiko desberdinen menpeko PZO aktiboen igorpen ezaugarrien ikerketa sakona egiteko balio izango digu, bai maila-indize eta baita indize gradualeko zuntzen kasuan ere. Eraitza guzti hauek hurrengo kapituluan zehar aurkeztuko dira.

3.5 Erreferentziak

- [1] M.J.F. Digonnet. "Rare earth doped fiber lasers and amplifiers". Marcel Dekker, Inc. 1993.
- [2] S. Muto, A. Ando, O. Yoda, T. Hanawa eta H. Ito, "Dye laser by sheet of plastic fibers with wide tuning range," *Trans. IEICE Japan*, vol. E70, pp. 317-318. 1987.
- [3] A. Tagaya, Y. Koike, T. Kinoshita, E. Nihei, T. Yamamoto eta K. Sasaki. "Polymer Optical Fiber Amplifier," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp. 883-884. 1993.
- [4] E. Desurvire eta J.R. Simpson. "Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 835-845. 1989.
- [5] M. Reha Ozalp, G. Ozen, A. Sennaroglu, A. Kurt. "Stimulated and spontaneous emission probabilities of Tm^{3+} in TeO_2-CdCl_2 glass: the role of the local structure," *Optics Communications*, vol. 217, no. 1-6, pp. 281-289. 2003.
- [6] E. Desurvire, M. Zirngibl, H.M. Presby eta D. DiGiovanni. "Characterization and modeling of amplified spontaneous emission in unsaturated erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 127-129. 1991.
- [7] L. Zhang, Z. Duan eta J. Chen. "Analytical solutions to rate equations of fiber lasers containing three-energy-level ions," *Optics Communications*, vol. 267, pp. 149-153. 2006.
- [8] J. Chen, X. Zhu eta W. Sibbett. "Derivation of the threshold pump power of erbium-doped fiber lasers," *Optics Letters*, vol. 17, no. 13, pp. 926-928. 1992.
- [9] M. Saito eta K. Kitagawa. "Axial and radial fluorescence of dye-doped polymer fiber," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 7, pp. 982-987. 2001.
- [10] M. Karimi, N. Granpayeh eta M.K. Morraveg Farshi. "Analysis and design of a dye-doped polymer optical fiber amplifier," *Applied Physics B*, vol. 78, pp. 387-396. 2004.

-
- [11] S.Y. Lam eta M.J. Damzen. "Characterization of solid-state dyes and their use as tunable laser amplifiers," *Applied Physics B*, vol. 77, pp. 577-584. 2003.
- [12] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. "Theoretical and experimental investigation of Rhodamine B-doped polymer optical fibre amplifiers," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 2215-20. 1995.
- [13] T. Kobayashi, A. Tagaya, S. Nakatsuka, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High-power polymer optical fiber amplifiers in the visible region," *Photonic and Optoelectronic Polymers*. Chapter 4, pp. 47-57. 1997.
- [14] S.B. Poole, D.N. Payne, R.J. Mears, M.E. Fermann eta R.I. Laming. "Fabrication and characterization of low-loss optical fibers containing rare-earth ions," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 4, no. 7, pp. 870-876. 1986.
- [15] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, S. Nishihara, Y. Nishizawa, A. Tagaya eta Y. Koike. "High-efficiency organic dye-doped polymer optical fiber lasers," *Applied physics letters*, vol. 77, no. 3, pp. 331-333. 2000.
- [16] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, Y. Koike eta Y. Okamoto. "Organic dye-doped polymer optical fiber lasers," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 11, pp. 612-616. 2000.
- [17] B.N. Upadhyaya, S. Kher, M.R. Shenoy, K. Thyagarajan eta T.P.S. Nathan. "Investigation on Yb-doped CW fiber lasers," *International conference on optoelectronics, fiber optics and photonics, Cochin, FBR 2.4, Photonics*. 2004.
- [18] P.R. Morkel eta R.I. Laming. "Theoretical modelling of erbium-doped fiber amplifiers with excited-state absorption," *Optics Letters*, vol. 14, pp. 1062-1064. 1989.
- [19] M. Peroni eta M. Tamburrini. "Gain in erbium-doped fiber amplifiers: a simple analytical solution for the rate equations," *Optics Letters*, vol. 15, pp. 842-844. 1990.
- [20] T. Georges eta E. Delevaque. "Analytic modelling of high-gain erbium-doped fiber amplifiers," *Optics Letters*, vol. 17, pp. 1113-1115. 1992.

-
- [21] J. Arrue, F. Jiménez, I. Ayesta, M.A. Illarramendi eta J. Zubia. "Polymer-Optical-Fiber Lasers and Amplifiers Doped with Organic Dyes," *Polymers*, vol. 3, pp. 1162-1180. 2011.
- [22] J. Zubia eta J. Arrue. "Plastic optical fibres: An introduction to their technological processes and applications," *Optical Fibre Technology: Materials, Devices and Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 101-140. 2001.
- [23] A. Tagaya, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High-power and high-gain organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: novel techniques for preparation and spectral investigation," *Applied Optics*, vol. 36, no. 3, pp. 572-578. 1997.

4. Kapitulu

Emaitza Konputazionalak

Laburpena— Kapitulu honetan, baldintza desberdinetan lorturiko potentzien analisi tenporal eta espektralekin lan egiteko gai den gure eredu konputazionalaren bitartez, dopaturiko PZOetan argi-anplifikazioaren ezaugarriak aztertuko dira. Gure emaitza teorikoak balioztatzeko hainbat datu esperimental ere sartu dira. Kotsideraturiko dopante bakoitzarentzako, igorpeneko espektroaren desplazamenduak, zabalera espektralaren aldaketak, seinale-uhin-luzerarekiko irabaziaren aldaketak, ponpaketa pultsu-zabalera tenporalaren aukeraketarik egokiena, zenbakizko irekiduraren eta dopantearen distribuzio erradialaren eragina, etab. ikertu ditugu. Analisi guzti hauek maila-indize eta indize gradualeko PZOentzat egin dira. Lorturiko emaitzak energia desberdinetako argi-pultsuen bitartez longitudinalki kitzikaturiko zuntz aktiboetan oinarritzen dira.

Kapitulu honen lehenengo puntuan, zuntzaren zeharreko igorpen-espektroaren desplazamendua ikertuko dugu, laser eta amplifikagailu sintonizakorrak eraikitzeke erabil daitekeelarik [1]. Lehendabizikoz, PZO aktiboentzako zuntz-luzera aldatzean igorpen-espektroa zenbateraino sintoniza daitekeen argituko dugu. Horretarako, dopanteen xurgapeneko eta igorpeneko gurutzeko arteko gainjarpenaren kopuruaren eraginean oinarrituko gara.

Honen ondoren, igorpen-espektroetan ponpaketa-pultsuek duten eragina ikertuko dugu, seinale-pultsua dagoenean eta baita seinale-pulsturik ez dagoenean ere. Azken kasu honetako argi-igorpen prozesuari, berezko igorpen amplifikatua edo ASE deitzen zaio [2]. ASE igorpenaren analisiak PZOzko laserretan irabazi handia lor daitezkeen uhin-luzera tarteari buruzko informazioa emango digu. Tesi-lan honen berritasunetako bat, guk dakigunez, ikerketa-lan hau lehendabizikoz konputazionalki egin dela da. Maila-indizeko eta indize

gradualeko PZO aktiboen azterketa espektrala egiteaz gain, hedapeneko ezau-garrien analisia eta konparaketa ere egin ditugu. Alde batetik, zenbakizko irekidura kontuan hartu da, eta, beste alde batetik, bai zuntzen nukleoko argipotentzia dentsitatearen distribuzioa eta baita dopante-kontzentrazioaren distribuzioa ere kontutan hartu dira. Kapituluako bigarren eta hirugarren puntuek, sarrera-seinalerik gabe (PZOzko laserrak) eta sarrera-seinalearekin (PZOzko anplifikagailuak) lor daitezkeen emaitzak erakusten dituzte, hurrenez hurren. Análisi konputazional hauek PZOzko laser eta anplifikagailuen diseinatze-etapan oso erabilgarriak izan daitezke.

4.1 Maila-indizeko PZOzko Laserretan Zeharreko Igorpen Espektralaren Desplazamenduak eta Zabaleraren Aldaketak

Análisi hau egin aurretik, ponpaturiko PZO dopatuetatik zehar hedatzen diren igorpen-espektroen batez besteko uhin-luzera eta FWHMa desplaza daitezkeela demostratzen duten hainbat neurketa esperimental erakutsiko ditugu. Portaera hau nabariagoa da xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioak modu adierazgarri batean gainezarrita dituzten dopanteen kasuan. Kapituluaren zehar ikusiko dugun bezala, hainbat dopante organikoren kasua da hau. Desplazamendu espektral hauek PZOzko laser eta anplifikagailu sintonizakorrak eraikitzeke erabil daitezke [3]-[5]. Honez gain, gaur egun PZO aktiboen erabil daitezkeen dopante barietate handia aurki dezakegu, bakoitzaren xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen kokapen-espektrala desberdina delarik. Beraz, diseinatzaileak anplifikazio uhin-luzera, desiotako tarte espektralean kokatzeko aukera izango du. Irabazirik altuenak normalean igorpeneko espektroaren maximotik hurbil kokatzen dira [6],[7]. Hala eta guztiz ere, erabilitako dopantearen eta zuntz-luzeraren arabera, zuntzaren xurgapenak eragin handia izango du igorpen-espektroan, uhin-luzera luzeagoetara (gorriranzko desplazamendua, ingelesez *red shift*) edo laburragoetara (urdineranzko desplazamendua, ingelesez *blue shift*) desplazatu daitezkeelarik [8]. Ponpaketa-potentzia ASE atariaren gaineratik baldin badago, igorpen estimulatua xurgapena baino nabariagoak izango dira, eta, ondorioz, zuntzaren zeharreko igorpenaren espektroak igorpeneko gurutze-sekzioaren maximoranzko desplazamendu urdina pairatuko du. Desplazamendu espektral hauek ponpaketa-potentzia eta zuntzaren luzeraren arabera izango dira [4],[9]. Aipaturikoa oso garrantzitsua da, izan ere, PZO aktiboen igorpen espektroek laser edo anplifikagailu moduan erabiltzen direnean anplifikatu ditzaketen uhin-luzera tartearen informazioa ematen baitigute.

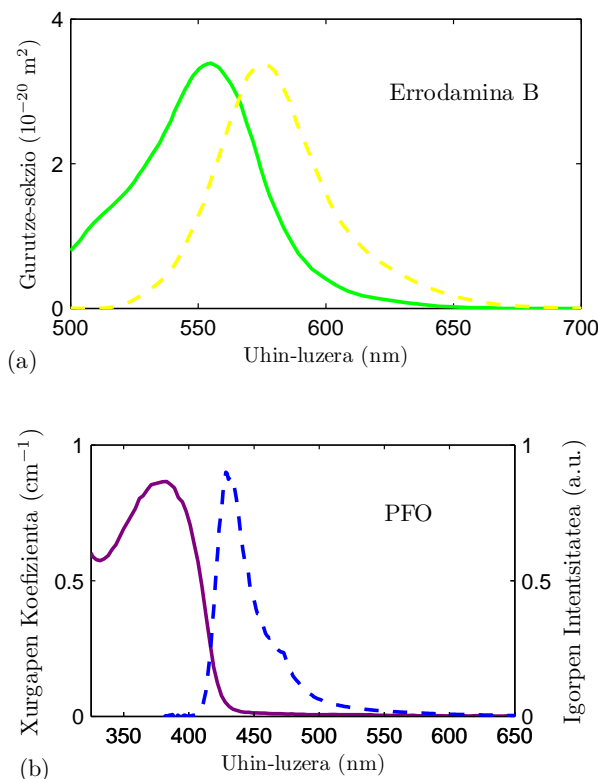
Atal honetan, dopaturiko PZOen igorpenak espektralki aztertuko ditugu, bai ASE atariaren gainetik eta baita atariaren azpitik ere. Analisi haue-tarako, PZOak energia desberdinetako argi-pultsu Gauss-ar ia monokromatiko-ekin kitzikatu dira, energia baxuenetik hasita, fluoreszentzia igorpena lortuz, energia altuagoetara helduz, ASE igorpena lortuz. Ponpaketa-energia (E) potentzia maximotik (P_{max}) modu erraz batean kalkula daiteke, denboran Gauss-ar den pultsuarentzat $E = P_{max} (2\pi)^{1/2} \text{FWHM} / 2.35$ baita. Atariaren gainetik egindako azterketa hauek erabilgarriak izan daitezke PZO aktibo-
irabazi espektrala sintonizatzeke [3]-[5]. Atariaren azpitik analisiak hainbat aplikazio garatzeko erabilgarriak ere izan daitezke. Adibidez, dopaturiko PZOen xurgapena neurtzeko eta galerak karakterizatzeke balio dezakete [9]. Gure ereduaren bitartez, xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen arteko gainjarpen desberdina duten dopante birekin dopaturiko PMMA PZOen izaera espektralak aztertuko ditugu. Bi dopanteetako bat oso ezaguna den Errodamina B da, gurutze-sekzioen arteko gainjarpen handia duena. Bigarren dopantea ordea, gainjarpen txikia duen poli(9,9-dioktilfluorenoa) (PFO bezala ezaguna) polimero konjokatua da.

Errodamina B eta PFO dopanteekin dopaturiko maila-indizeko PZOen izaera espektrala konparatzen hasiko gara. Potentzia desberdinetako pultsu Gauss-arren bitartez luzetarako kitzikapenarekin $z = 0$ posizioan ponpatzen da zuntza. Errodamina B-ren kasuan, pultsuaren zabalera (FWHM) tenporala 5 ns-koa dela kontsideratu da, dopante berarekin publikaturiko emaitza esperimentalekin bat eginez [1]. PFO dopantearen kasuan, pultsuaren zabalera 0.1 ns dela kontsideratu da, dopantearen fluoreszentzia-erdibizitza baino txikiagoa delarik. Errodamina B eta PFO dopanteen erdibizitzak (τ parametroa gure ekuazioetan) 2.85 ns eta 0.227 ns dira, hurrenez hurren [10],[11]. Emaitzetan irudikaturiko energia espektralek denboran integraturiko potentziak adierazten dituzte, hots:

$$E(z, \lambda_k) = \int_0^{\infty} P(t, z, \lambda_k) dt \quad (4.1)$$

Aurreko kapituluan erakutsi dugun ereduak xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen ezagutza izatea behar du, hau da, aldez aurretik neurtu edo literaturan aurkitu behar dira. Errodamina B eta PFO molekulekin dopaturiko PZOen datuak 4.1 irudian ikus daitezke. Errodamina B dopantearekin erlazionaturiko irudiak hainbat artikulutan aurki daitezke [1],[12]. PFO-rekin erlazionatutakoak ordea, guk geuk esperimentalki zehaztu ditugu. Horretarako, esperimentalki lorturiko kurba-itxurak erreferentzia bezala hartu eta igorpen gurutze-sekzioaren maximoa $7.5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ dela kontuan hartu dugu [11]. Xurga-

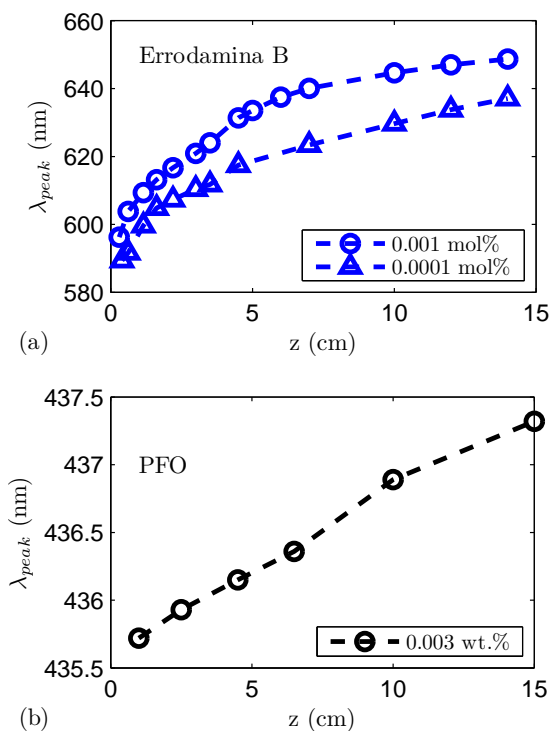
pen gurutze-sekzioaren maximoa esperimentalki lorturiko atenuazio-koefizientearen eta dopante-molekula kontzentrazioaren arteko zatidura bezala kalkulatu da. Honek balio maximoa $3.6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ dela eman digu. Ikus daitekeen bezala, igorpeneko eta xurgapeneko gurutze-sekzioak era nabari batean gainezartzen dira Errodamina B-ren kasuan eta oso gutxi PFO-ren kasuan. Gainjarpenak duen eraginaren inguruko ezagutza hobea izateko, zuntzaren luzeran zeharreko igorritako potentziaren desplazamendua aztertu dugu bi dopanteen kasuan.



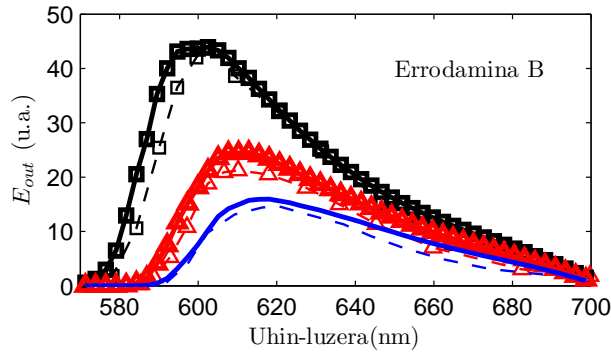
4.1 irudia: (a) Errodamina B eta (b) PFO-ren xurgapen (lerro solidoa) eta igorpen (lerro marratua) espektroak PMMA materialean.

Atariaren azpitik Errodamina B-ren kasuan lorturiko emitza konputazionalek [ikus 4.2(a) irudia] zuntzaren lehenengo zentimetroetan igorpeneko uhin-luzera maximoaren (λ_{peak}) gorriranzko desplazamendu handia erakusten dute. Efektu hau nabariagoa da dopante kontzentrazioa handitzean. Portaera bera espermentalki ere argitaratu da [1]. Zehatzagoak izateko, [1] artikuluko autoreek, eurek fabrikaturiko nukleo txikiko (modu-anitzeko) PZOen hainbat emitza esperimental publikatu zituzten, Errodamina B-ren 0.0001, 0.001 eta 0.002 mol% kontzentrazioekin. Artikuluan azaltzen duten bezala, azken kon-

tzentrazio hori ez zen guztiz disolbatu. Aipaturiko kontzentrazioetarako, 5 ns-ko, 5 mW-ko 543.4 nm-tan zentratutako pultsuak ponpatu zituzten. Geuk kalkulaturako 4.2(a) irudian ikus daitekeen bezala, lehenengo 5 cm-etan $\lambda_{peak}(z)$ -aren gorriranzko desplazamendu jarraitua gertatzen da. 4.3 irudian, gure emaitza konputazionalak emaitza esperimentalekin bat egiten dutela ere ikus daiteke. [1] erreferentzian, dopante-kontzentrazioa disolbatu zitekeenaren maximoak hurbil zegoenean (zehatzagoak izateko, 0.001 mol%), $\lambda_{peak}(z)$ -aren malda ez zen konstantea. Haiek neurtu zuten eta guk kalkulatu dugun bezala [ikus 4.2(a) irudia], malda handiagoa da hasieran eta modu argi batean leuntzen da $z > 3$ cm denean. 0.65 cm-tik 3 cm-ra, $\lambda_{peak}(z)$ 605 nm-tik 625 nm-ra desplazatzen da. Kontzentrazio baxuenean ere, $\lambda_{peak} = 600$ nm ($z = 0.5$ cm denean) izatetik 640 nm ($z = 14$ cm denean) izatera pasatzen da. Errodamina B-ren kontzentrazioa altua denean gorriranzko desplazamendua hain handia izatearen arrazoia atenuazio altua da. Honek, igorpeneko espektroarekin gainjartzen den xurgapen espeketroaren itxuraren garrantzia areagotzen du.



4.2 irudia: Uhin-luzera maximoaren eboluzioa (guk kalkulaturikoa) zuntzen luzeraren menpe (atariaren azpitik). (a) Errodamina B-rekin dopaturiko zuntza ponpaketa-energia dentsitatea $8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ denean (dopantearen kontzentrazioa legendan). (b) PFO-rekin dopaturiko zuntza ponpaketa-energia dentsitatea $0.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ denean (dopantearen kontzentrazioa legendan).

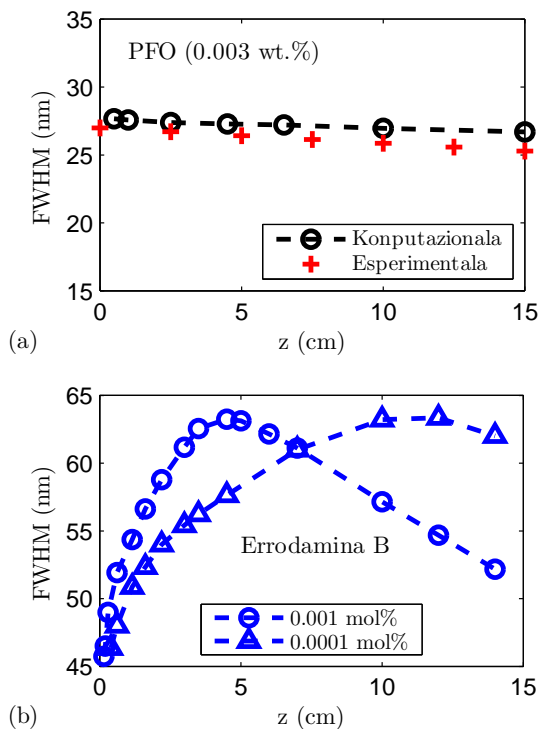


4.3 irudia: Fluoreszentzia espektraok konputazionalki (lerro-solido mardulak) eta esperimentalki [1] (marra-lerro meheak) lortuak hiru propagazio distantzietarako z : 1.15 cm (markatzaile karratuak), 3.15 cm (markatzaile triangeluarrak) eta 5.15 cm (markatzaile gabekoak). Kontzentrazioa 0.001 mol% da.

Konparaketa egiteko asmoarekin, PFO zuntzaren $\lambda_{peak}(z)$ -ren gorriranzko desplazamendua ere lortu dugu. 4.2(b) irudian ikus daitekeen moduan, kasu honetan kurba zeharo lineala da eta desplazamendua askoz txikiagoa da. Irudia 0.003 wt% PFO kontzentrazioarekin dopaturiko PZOari dagokio. Hau da, PMMA materialean dopante hau dopa daitekeen kontzentrazio maximotik gertu. Xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen arteko gainezarpen txikiagoak azaltzen du zergatik den urriagoa, kasu honetan, gorriranzko desplazamendua. Konputazionalki lorturiko desplazamendu honek bat egiten du gure ikerketa-taldean neurtutako emaitza esperimentalekin [13], non PFO-ren kontzentrazioa 0.003 wt% zen eta ponpaketa potentzia atariaren azpitik zegoen. Zehatzagoak izateko, $1 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ baino energia baxuagoko nitrogenu laser pulsatua erabili zen zuntza kitzikatzeko.

Hurrengo lerroetan zabalera espektralaren eboluzioa aztertuko dugu. Ponpaketa-energia atariko baxuagoa denean, FWHM-ren hasierako zabalkuntza bat gerta daiteke, estutze batek jarraitzen diolarik (ikus 4.4 irudia). 4.4(a) irudian, hau da, PFO-ren kasuan, 0.5-15 cm-ko zuntz-luzera tartean FWHM-ren aldaketak txikiak direla erakusten da, emaitza esperimentalekin bat eginez. Marra-lerroak konputazionalki lortu ditugun emaitzak adierazten ditu eta gurutze-markatzaileek dagozkien emaitza esperimentalak adierazten dituzte [13]. Errodamina B-rekin dopaturiko zuntzaren kasuan, banakako uhin-luzeren atenuazioen aldaketek (espektra gorrirantz asko desplazatu ez denean) distantziarekiko zabalera espektralaren hasierako zabaltzea dakarte. Aldi berean, uhin-luzera maximoaren desplazamendua gertatzen da. Efektu hau hasieran da nabariagoa, igorritako argiaren espektra eta xurgapeneko gurutze-sekzioaren gainjarpenera handiagoa denean. Honek azaldu egiten du hasierako FWHM-ren zabaltzea distantziarekin [ikus 4.4(b) irudia]. FWHM-

ren aldaketak PFO-ren kasuko aldaketak baino nabariagoak dira, baita irudian azaltzen den Errodamina B-ren kontzentrazioarik baxuenerako ere (0.0001 mol%).



4.4 irudia: Zabaleraren espektralaren (FWHM) eboluzioa distantziarekiko (a) PFO (konputazionala eta esperimentala) eta (b) Errodamina B-ren kasuetan. Ponpaketa-energiak atariaren azpitik daude: $0.69 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ PFO-ren kasuan eta $8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ Errodamina B-ren kasuan. Dopante bakoitzaren kontzentrazioa: legendan.

Kasu batzuetan, espektroaren urdineranzko desplazamendu erlatiboa gertatzen dela ohartu gara, baina beti ponpaketa-potentzia aski altua denean. Honen arrazoia hurrengo modu honetan azal daiteke. Igorpen-bandaren uhin-luzera maximoan xurgapena altua da, baina atenuazio hau, konpentsatu egiten da eta igorpena nagusitu atariaren gainetik, igorpen-probabilitate handiagoen ondorioz. Honen ondorioz, ponpaketak behar adinako potentzia baldin badu, distantziarekiko urdineranzko desplazamendua gerta daiteke, alegia, igorpeneko gurutze-sekzio maximoaren alderanzko desplazamendua distantziarekin, hain zuzen ere. Desplazamendu honen egiaztatze esperimentala literaturako hainbat artikulutan aurki daiteke: Errodaminarekin dopaturiko zuntzetan [4], nano-partikulekin atxikitako Errodamina soluzioetan [14] eta egoera-solidoko

dopanteetan [15]. Dakigunaren heinean, PFO-rekin dopaturiko zuntzen kasuan ez da urdineranzko desplazamendu honen berri eman.

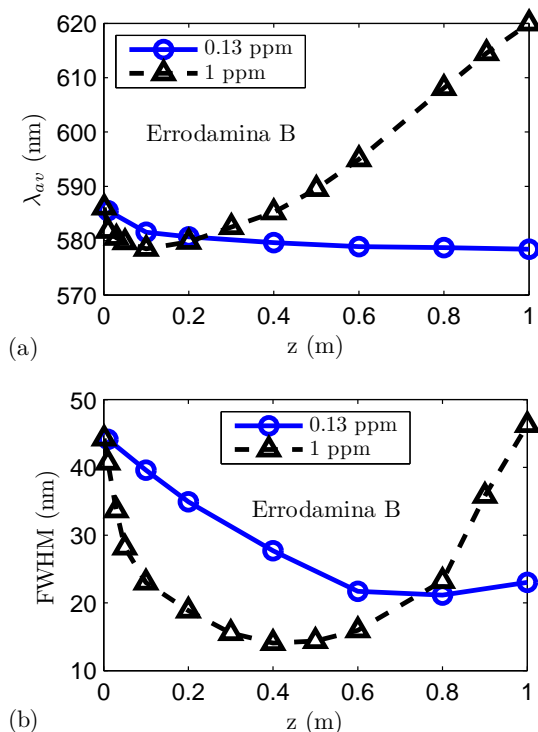
Hurrengo lerroen helburua atariaren gainetik Errodamina B-rekin dopaturiko zuntzen igorpeneko desplazamendu espektralarekin eta zabalera espektralarekin zer gertatzen den jakitea da. Konparaketak errazteko asmoz, kapituluaren zehar simulazioak egiteko erabili izan ditugun parametroen balioak 4.I Taulan laburbildu ditugu. Simulazioaren baten, parametro hauetariko baten balioa aldatuz gero, kasu bakoitzean aldatutako parametroaren balio eguneratua testuan adieraziko da.

4 I TAULA: ERRODAMINA B-REKIN DOPATURIKO MAILA-INDIZE ETA INDIZE GRADUALEKO PZOZKO LASER ETA ANPLIFIKAGAILUAK SIMULATZEKO ERABILTAKO PARAMETROAK.

Parametroa	Notazioa	Balioa
Seinalearen potentzia (egotekotan)	P_s	1 W
Seinalearen uhin-luzera	λ_s	591 nm
Seinalearen zabalera espektrala	FWHM	3.5 ns
Ponpaketaren potentzia	P_p	5, 11 kW
Ponpaketaren uhin-luzera	λ_p	532 nm
Ponpaketaren zabalera espektrala	FWHM	6 ns
Seinalearen atenuazioa	$\alpha(\lambda_s) = \alpha_s$	8.50 dB/m
Ponpaketaren atenuazioa	$\alpha(\lambda_p) = \alpha_p$	8.13 dB/m
Zuntzaren luzera	L	1 m
Nukleoaren erradioa	a_0	0.25 mm
Xurgapeneko gurutze-sekzioa (λ_p)	$\sigma_{abs}(\lambda_p)$	$2.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Igorpeneko gurutze-sekzioa (λ_s)	$\sigma_{emi}(\lambda_s)$	$2.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Fluoreszentzia-erdibizitza	τ	2.85 ns
Dopantearen kontzentrazioa	–	0.13 ppm

Zuntzaren distantzia laburretarako, eta ponpaketa potentzia altuetarako (atariaren gainetik), z -rekiko P -ren uhin-luzera maximoaren urdineranzko desplazamendu erlatiboa dagoela ohartu gara, igorpen gurutze-sekzioaren maximoaren alderanzko desplazamendua, hain zuzen ere. 4.5(a) irudian ikus daitekeen moduan, batez besteko uhin-luzeraren (λ_{av}) hasierako gutxitze bat dago, gehikuntza batez jarraitua, 4.I Taulako parametroak erabilia (ponpaketa-potentzia 5 kW) eta Errodamina B dopantearen kontzentrazio altuagoetarako ere. Batez besteko uhin-luzera modu honetan definitzen da:

$$\lambda_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \quad (4.2)$$



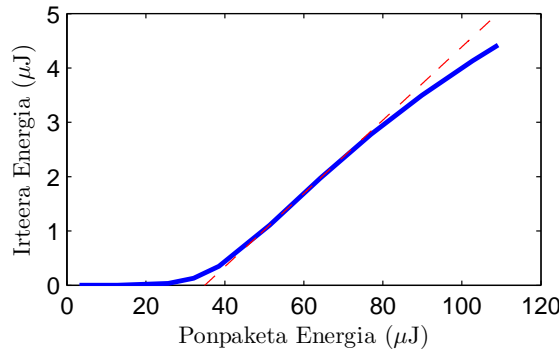
4.5 irudia: Bi kontzentrazio desberdinetarako (a) batez besteko uhin-luzeraren eta (b) FWHM-ren eboluzioak distantziarekiko.

λ_{av} -ren urdineranzko desplazamendua hasieran gertatzen da bereziki, igorpeneko gurutze-sekzioaren uhin-luzera maximoaren inguruko irabazia handiagoa denean. Honek igorpeneko gurutze-sekzioaren maximoranzko desplazamendua eragiten du [ikus 4.5(a) irudia]. Zabalera espektralaren (FWHM) estutze bat ere gertatzen da hasieran [ikus 4.5(b) irudia]. Honen azalpena gorri-ranzko desplazamenduaren antzekoa da, desberdintasun bakarra igorpeneko gurutze-sekzioaren eragina izanik, atariaren gainetik xurgapenarena baino handiagoa baita, eta, ondorioz, efektuak alderantzurik baitaude. Beste modu batean esanda, edozein uhin-luzeratan lorturiko irteerako potentzia, irabaziaren eta atenuazioaren koefizienteen arteko aldearen eta zuntzaren luzeraren menpekoa da. Zuntzaren luzera edo dopantearen kontzentrazioa aldatuz gero, uhin-luzera desberdinetako potentzia guztiak ere aldatu egingo lirateke, irteera-

espektro desberdina sortuz. Esperimentalki ikusi den bezala [4], ponpaketa-potentzia handituz gero, igorpeneko gurutze-sekzioaren maximoranzko desplazamendua (urdineranzko desplazamendua) lortzen da, nahiz eta zuntzaren luzera konstante mantendu.

4.2 Malda-efizientzia eta Ataria MI eta IGko PZOzko Laserretan

Zuntzaren distantziarekiko desplazamendu desberdinak ikusi ostean, hurrengo lerroen helburua ASE igorpeneko ezaugarrien ezagutzan sakontzea izango da, hau da, parametro desberdinen menpeko MI eta IG PZOen malda-efizientzia eta ASE-atariaren eboluzioak aztertuko ditugu. Zehatzagoak izateko, PZOen zenbakizko irekiduren eta kitzikatze-baldintzen eraginak aztertuko ditugu.

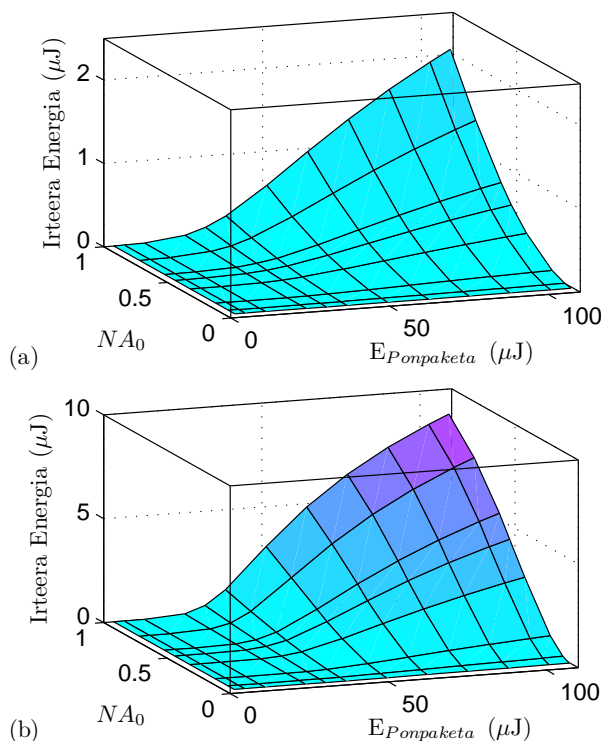


4.6 irudia: Malda-efizientzia hurbilketa-kurba zuzenaren malda bezala definitzen da eta ASE-ataria hurbilketa-kurbaren ardatz horizontalarekiko ebakidura bezala definitzen da.

4.2.1 Zenbakizko Irekiduraren Eragina

Lehenik eta behin, gure eredu konputazionalaren bitartez, ASE igorpeneko ezaugarrietan simetria ardatzeko zenbakizko irekiduraren NA_0 (edo β -aren) eragina zein den aztertzen hasiko gara. Bigarren kapituluan azaldu dugun bezala, ikertzaile batzuen aburuz, igorpenaren zabalera espektrala, energia baxuekin duen zabaleraren erdira jaisten da ponpaketa energia igotzean eta behin ASE-ren igorpen atarira heltzean [16]. Beste ikertzaile batzuen aburuz, ordea, ASE atariaren gainetik zuntzaren irteerako energiak ponpaketa-energiarekin menpekotasun lineala du, malda efizientzia hurbilketa-kurba zuzenaren malda bezala definitzen dute eta ASE-ataria ardatz horizontalarekiko ebakidura bezala definitzen dute. Definizio hauetatik lor daitezkeen ASE-atari

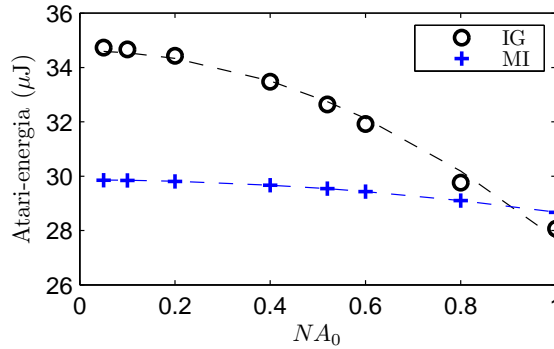
baliok oso antzekoak diren arren, kapitulu honetan zehar bigarren definizioa hartu dugu kontutan, 4.6 irudian ikus daitekeen moduan. Lortutako emaitzek egoera erreal bateko emaitzen baliokideak izateko, esperimentalki erabilitako parametro berdinak [13],[17] (ikus 4.I Taula) erabiliz egin ditugu simulazioak.



4.7 irudia: Zuntza energia desberdinekin kitzikatzean 581 nm-ko irteerako energiaren eboluzioa, zenbakizko irekiduraren balio desberdinentzako. (a) MI eta (b) IG PZOak $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak.

4.7 irudiak zuntzaren zenbakizko irekidurak eta ponpaketa-energiak irteerako energian (581 nm-tan) duten eragina adierazten du. Simulazio parametroak arestian aipaturikoak dira, nukleoko errefrakzio indizea $n_1 = 1.492$ dela kontsideratuz. Kualitatiboki, MI eta IG PZOen eboluzioa berdina da (4.7(a) irudia eta 4.7(b) irudia, hurrenez hurren). Ponpaketa-energia baxua denean, igorritakoa gehienbat igorpen espontaneoaren ondorioa da. Hau dela eta, irteerako energia malda txikiarekin hazten da. Atariaren gaintetik, ordea, populazio-inbertsioa gertatzen da eta espontaneoki igorritako fotoiak anplifikatu egiten dira zuntzaren zeharreko iraganaldi bakarrean. Ponpaketa energia oso altuekin, saturazio efektuak nabariak dira, kurben maldak murrizten dituztelarik [ikus 4.7(b) irudia]. Atariaren gaintetik, NA_0 -ren balio altuetarako irteerako energia altuagoak lortzen dira, espero bezala. Izan ere, NA_0 -ren balio

altuek zuntzaren zehar hedatuko diren fotoi gehiago egongo direla suposatzen du, eta hauek igorpen estimulatatu gehiago sortuko dituzte. Hau horrela izanik, ez da arraroa zuntzaren irteeran energia gehiago izatea. NA_0 -ren balio berdina kontsideratuz, IG zuntzen irteerako energia MI zuntzekin lortutakoa baino lau aldiz handia dela ohar gaitezke. Honen arabera, IG PZOzko laserretan, irteerako energian gainjarpen-faktorearen γ eragina handiagoa da, MI PZOetan NA -ren (edo β -ren) batez besteko handiago bat izatearen eragina baino.



4.8 irudia: ASE-ataria 581 nm-tan zuntzaren ardatzeko zenbakizko irekiduraren menpe. MI (zirkulu-markatzaileak) eta IG (gurutze-markatzaileak) PZOetan, $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak. Lerro marratuek $Thr = c_1 \cdot NA_0^2 + c_2$ adierazpena betetzen dute, MI PZOen kasuan $c_1 = -1.18$ eta $c_2 = 29.8$ eta IG PZOen kasuan $c_1 = -6.91$ eta $c_2 = 34.6$.

4.7 irudiko kurba bakoitzari hurbilketa-kurba zuzen bat doitu diogu, kontsideraturiko NA_0 bakoitzerako malda-efizientziak eta atari energiak lortuz. Alde batetik, 4.8 irudian ikusten den bezala, atarira heltzeko beharrezko energia gutxiagotu egiten da NA_0 handiagoa denean. Ausazko laserretan ere eboluzio bera gertatzen da [18]. Edonola ere, PZOetan eginiko analisia geuk egin dugu lehendabizikoz, guk dakigunez. Beste alde batetik, 4.8 irudiak NA_0 -ren menpeko atari-energiaren eboluzioa funtzio koadratiko batekin doitu daitekeela ere erakusten du, bai MI eta baita IG PZOetan ere. Eboluzio hau demostratzeko asmoz, 3. Kapituluako (3.1) eta (3.2) ekuazioetatik kalkulu sinple eta hurbilduak egin ditugu, dopante molekulen populazio-inbertsioa ($N_1 \approx N_2$) gerta dadin beharrezko ponpaketa-atariaren espresio analitikoa lortzeko asmoz.

Igorpeneko uhin-luzera bakarra eta egoera geldikorra kontsideratzen hasiko gara. (3.1) ekuaziotik P fotoien xurgapenaren terminoa (birxurgapena) ekidinez, hurrengoa lortzen dugu:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 = \frac{-N_2}{\tau} - \left(\frac{\sigma_{emi}(\lambda_k) N_2}{h(c/\lambda_k) A_{core}} \right) P\gamma + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right) P_p \gamma \quad (4.3)$$

Bigarren terminoko zenbakitzailea askatuz gero:

$$\sigma_{emi}(\lambda_k) N_2 P\gamma = \frac{-N_2 h(c/\lambda_k) A_{core}}{\tau} + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1 h(c/\lambda_k) A_{core}}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right) P_p \gamma \quad (4.4)$$

(3.2) ekuazioko eskuma-aldeko lehenengo terminoa goiko espresioarekin ordezkatzuz gero:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial z} = 0 = & \frac{-N_2 h(c/\lambda_k) A_{core}}{\tau} + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1 h(c/\lambda_k) A_{core}}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right) P_p \gamma \\ & - \sigma_{abs}(\lambda_k) N_1 P\gamma + \frac{N_2}{\tau} \left(h \frac{c}{\lambda_k} \right) \beta A_{core} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Azkenik, atarian $P \approx 0$ eta $N_1 \approx N_2$ direla kontsideratuz, hurrengo espresio analitikora heltzen gara:

$$P_p^{th} = \frac{h(c/\lambda_p) A_{core}}{\tau \gamma \sigma_{abs}(\lambda_p)} (1 - \beta) \propto (1 - NA_0^2) \quad (4.6)$$

segmentu parabolikoa delarik. Ikus daitekeen moduan, ekuazio honek 4.8 irudian ikusitako eboluzio kualitatiboa egiaztatzen du.

Honez gain, 4.9 irudian ikus daitekeen bezala, NA_0 balio altuekin askoz ere malda-efizientzia altuagoak lor daitezke, espero bezala. Beste alde batetik, marra-lerroek zenbakizko irekiduraren menpeko malda-efizientziaren eboluzioa funtzio koadratiko batekin doitu daitekeela ere erakusten dute. Ponpaketa-atariaren kasuan egindakoaren antzera, 3. Kapituluako (3.2) eta (3.3) ekuazioetatik beste kalkulu bat egin dugu malda-efizientziaren espresio analitikoaren lortzeko asmoz.

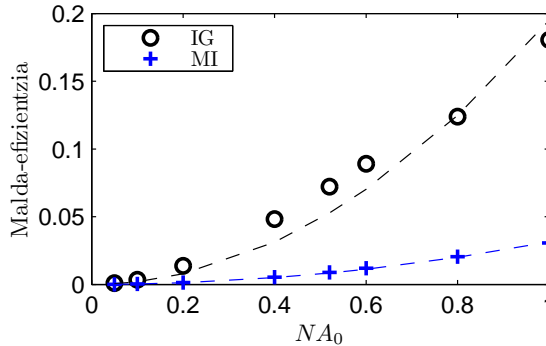
Malda-efizientziaren espresio analitikoaren kalkulua hurrengo modu honetan egin daiteke:

$$\eta = \frac{\left| \frac{\partial P}{\partial Z} \right|}{\left| \frac{\partial P_p}{\partial Z} \right|} = \frac{\left| \sigma_{emi}(\lambda_k) N_2 P \gamma - \sigma_{abs}(\lambda_k) N_1 P \gamma + \frac{N_2}{\tau} \left(h \frac{c}{\lambda_k} \right) \beta A_{core} \right|}{\left| -\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1 P_p \gamma \right|} \quad (4.7)$$

Irabazia eta galerak ordezkatzeko dituzten terminoak berdinduz gero, hurrengo espresio analitikoak lor daitezke:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} \frac{\left(h \frac{c}{\lambda_k} \right) A_{core}}{\tau \sigma_{abs}(\lambda_p) P_p \gamma} \beta \propto NA_0^2 \quad (4.8)$$

4.9 irudiko emaitzekin bat eginez, 4.8 ekuazioak NA_0 -rekiko malda-efizientziaren eboluzioa koadratikoa azaltzen du.



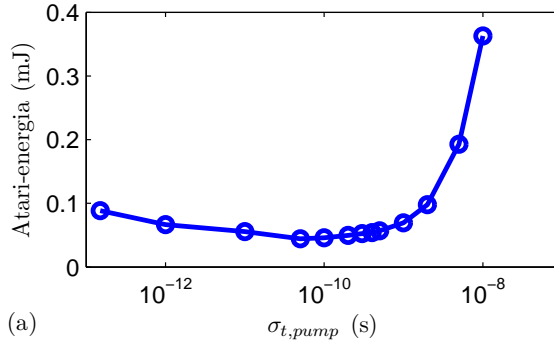
4.9 irudia: Malda-efizientzia (η) 581 nm-tan zuntzaren ardatzeko zenbakizko irekiduraren menpe, MI (zirkulu-markatzaileak) eta IG (gurutze-markatzaileak) PZOetan $\gamma = 1.43$ denean. 4.I Taulako parametroak. Lerro marratuek $\eta = c_1 NA_0^2$ adierazpena betetzen dute, MI PZOen kasuan $c_1 = 0.031$ eta IG PZOen kasuan $c_1 = 0.2$ izanik.

Azkenik, 4.9 irudiak erakusten duen moduan, MI PZOetan (zirkulu-markatzaileak) lorturiko balio maximoak ez dira IG PZOetan (gurutze-markatzaileak) lorturikoen bezain altuak, gainjarpen-faktorearen eragina batez besteko NA -rena baino handiagoa dela berriro ere erakutsiz.

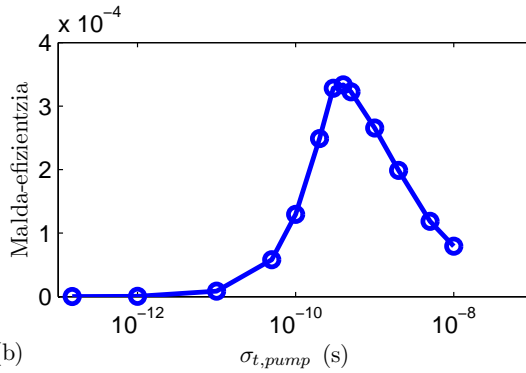
4.2.2 Ponpaketa-Ezaugarrien Eragina

Hurrengo lerroetan, ponpaketa-ezaugarriek igorpenean duten eragina aztertuko dugu. Alde batetik, laser-ataria minimizatzen duen ponpaketa pulsuaren zabalera tenporal optimo bat dagoela ikusiko dugu, eta, beste alde

batetik, igorpenaren malda-efizientzia maximizatzen duen beste zabalera optimo bat dagoela. Honez gain, luzera desberdinetako MI eta IG PZOzko laserren pultsu-zabalerarekiko sentsibilitatea ere aztertuko dugu.



(a)



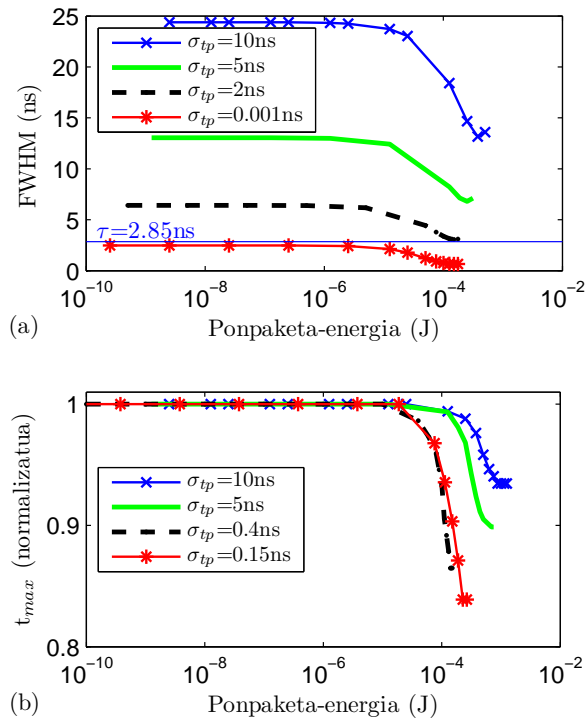
(b)

4.10 irudia: (a) Ponpaketa atari-energia eta (b) malda-efizientziaren eboluzioa $\sigma_{t,pump}$ parametroaren menpe.

4.10 irudiak ponpaketa pultsu Gauss-arren zabalera tenporalak ($\sigma_{t,pump}$) atarian eta efizientzian duen eragina erakusten du. Zehatzagoak izateko, luzetara kitzikaturiko ohiko MI PZOaren ponpaketa-zabalera tenporalarekiko ($\sigma_{t,pump}$ -rekiko) eboluzioa erakusten du. Ohikoa den bezala, σ letra Grekoak zabalera efektiboa edo desbiderapen estandarra adierazten du, FWHM-rekiko proportzionala delarik (kurba Gauss-arretan $FWHM = 2.35\sigma$). Hurrengo kalkuluetarako erabilitako parametroak ondorengoak dira: kontsideraturiko dopantea Errodamina B da, 1 ppm-ko kontzentrazioarekin, nukleoko erradia 0.5 mm da eta ardatzeko errefrakzio indizea $n_1 = 1.492$ da. Honez gain, 4.10 irudia simulatzeko, MI PZOa, $NA_0 = 0.51$, $\gamma = 1$ eta zuntzaren luzera $L = 17$ cm dela kontsideratu da.

4.10(a) irudian ASE-ataria minimizatzen duen ponpaketaren pultsu-zabalera tenporal optimo bat dagoela ikus daiteke, 0.1 ns inguruan hain zuzen ere. Pultsu zabalagoentzako, atariak bizkor egiten du gora. Pultsu-zabalera

fluoreszentzia-erdibizitzaren antzekoa edo handiagoa denean ($\tau = 2.85$ ns Errodamina B-ren kasuan), igorpen espontaneoek ponpaketa-pultsuaren hasierako partearen bidez lorturiko populazio-inbertsioa desegiteko joera daukate. Beste alde batetik, zuntzetik zehar hedaturiko pultsu laburregietan, energia zuntzaren tarte oso laburrean bakarrik mantentzen da altu, pultsua oso bizkor erortzen baita denboran. Honen ondorioz, ASE-ataria minimizatzen duen ponpaketa-pultsu-zabalera tenporal optimo bat dagoela ikus dezakegu eta baita ataria erlatiboki baxu mantentzen duen pultsu-zabalera tarte komenigarria ere. Irudi hau egiteko parametroak kontuan harturik (0.17 m-ko MI PZOa), tarte komenigarria 10 ps eta 500 ps artean kokatzen da.

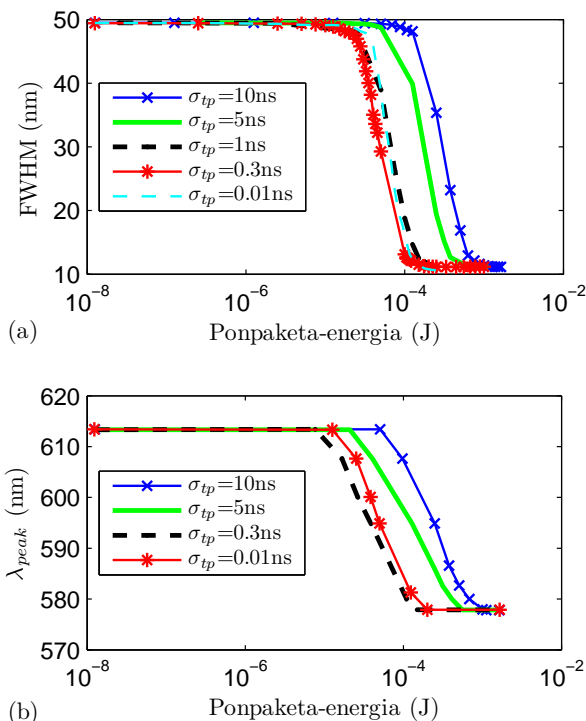


4.11 irudia: (a) FWHM tenporalaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. FWHM minimoa τ -ren parekoa da. (b) Igorpeneko maximoen denboren (zuntzaren irteerako denbora maximo normalizatuak) eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pultsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. 0.17 m-ko MI PZOa.

4.10(b) irudiak igorpenaren malda-efizientzia maximizatzen duen beste zabalera optimo bat dagoela erakusten du, 0.4 ns inguruan. Malda-efizientzia altu mantentzen duen $\sigma_{t,pump}$ tarteak dagoela ere ikus dezakegu, 150 ps eta 2000 ps artean, hain zuzen ere. Ondorioz, kontsideraturiko parametroentzat

atari baxua eta efizientzia altua 150 ps - 500 ps tartean teilkatzen direla ohar gaitzke, Errodamina B-ren kasuan. Hori $\tau/10$ da gutxi gorabehera.

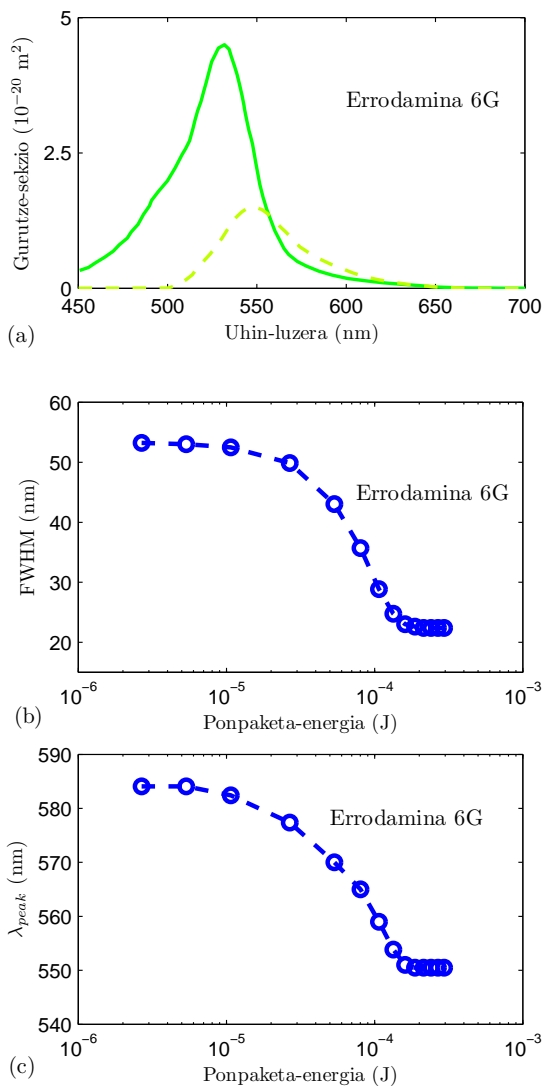
Zuntza kitzikatzeko erabilitako ponpaketa energia atari-balioa baino gehiago igotzean, igorritako pultsuaren FWHM tenporala estutu egiten da, 4.11(a) irudian ikus daitekeen bezala. Eboluzio kualitatibo bera alde aurretik esperimientalki ikusi da [19]. FWHM tenporalaren estutzea modu-kopuruaren gutxitzearen ondorioa izan daiteke. Izan ere, energia-transferentzia gertatzen da potentzia baxuko moduetatik igorpen maximoaren inguruko moduetara [4],[20]. Bestalde, 4.11(a) irudiak ponpaketa pultsua oso laburra denean irteerako pulsu-zabalera Errodamina B-ren fluoreszentzia-erdibizitzaren antzekoa dela erakusten du, beraz τ azpi-limitea da. Aipatzea merezi du ere, $\sigma_{t,pump}$ fluoreszentzia-erdibizitza baino zabalagoa denean, irteerako FWHMa $\sigma_{t,pump}$ -rekin zabaltzen dela.



4.12 irudia: (a) FWHM espektralaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pulsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. (b) Uhin-luzera maximoaren eboluzioa ponpaketa-energiaren menpe, pulsu-zabalera desberdinak kontsideratuz. 0.3 m-ko MI PZOa.

Ponpaketa-energia atari-energiaren inguruan kokatzen denean, ponpaketa pulsuaren maximorantz desplazatzen den maximo tenporalaren bat-

bateko desplazamenduak ere badaudela 4.11(b) irudian ikus dezakegu. Eboluzio honek bat egiten du [14] erreferentzian ikus daitezkeen eboluzio esperimentalekin. Honez gain, [15] erreferentzian deskribaturiko espresio teorikoak demostratu egiten du ponpaketa-energia handiagoa den heinean erantzun tenporala bizkorragoa dela.



4.13 irudia: PMMA materialean txertaturiko Errodamina 6Gren (a) xurgapeneko eta igorpeneko espektroak. (b) FWHM espektralaren eta (c) uhin-luzera maximoaren eboluzioak ponpaketa-energiaren menpe [21] artikuluko simulazio parametro berdinak erabilia.

Era berean, zuntza kitzikatzeko erabilitako ponpaketa-energia atari balioren gaintetik igotzean, igorritako espektroaren FWHMa estutu egiten dela [ikus 4.12(a) irudia] eta uhin-luzera maximoa, igorpen gurutze-sekzioaren maximora desplazatzen dela ikus dezakegu [ikus 4.12(b) irudia]. Portaera hauek, igorpeneko eta xurgapeneko espektroen arteko gainjarpen handia duten dopanteen artean gertatzen da, adibidez, Errodamina B edo Errodamina 6G (ikus 4.13 irudia) bezalako dopanteetan. 4.13(b) eta 4.13(c) irudiak [21] artikuluan erabilitako parametro berdinekin lortu dira, zuntz luzera laburragoa eta kontzentrazio altuagoko kasuari dagokiolarik.

Pultsu zabalerari dagokionez, FWHM-aren bat-bateko beherakadak atari-energiaren gutxi gora-beherako posizioa adierazten duela kontuan harturik, 4.12(a) irudian energia-atari baxuena behar duen pultsu-zabalera 0.3 ns-takoa dela ikus dezakegu. Zabalera hau dopantearen fluoreszentzia-erdibizitzaren hamarrenaren ingurukoa da, lehen komentatu den bezala. 4.11 eta 4.12 irudiak erkatuz gero, 0.3 m-ko kasuan atari-energia 0.17 m-ko kasuarena baino pixka bat altuagoa dela ikus dezakegu. Eboluzio hau azaltzeko asmoz, (3.1)-(3.3) ekuazioen bitartez atari-energiaren espresio analitikoa lortu dugu, (4.6) ekuazioan jardun dugun antzera, baina, kasu honetan, zuntzaren luzeran zeharreko galerak kontuan hartu direlarik. Uhin-luzera bakarrerako egingo dugu kalkulua.

(3.1) ekuazioan atari-energian $P \approx 0$ dela kontsideratzen hasiko gara:

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 = \frac{-N_2}{\tau} + \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right) P_p \gamma \quad (4.9)$$

N_2 askatuz gero:

$$N_2 = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_p) N_1 \gamma \tau}{h(c/\lambda_p) A_{core}} P_p \quad (4.10)$$

(3.3) ekuazioa egoera geldikorrean kontsideratuz eta $N_1 = N - N_2$ erabiliz gero:

$$\frac{\partial P_p}{\partial z} = -\sigma_{abs}(\lambda_p) N P_p \gamma + \sigma_{abs}(\lambda_p) N_2 P_p \gamma \quad (4.11)$$

(4.10) ordezkatzuz gero:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_p}{\partial Z} &= -\sigma_{abs}(\lambda_p)NP_p\gamma + \sigma_{abs}(\lambda_p)P_p\gamma \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)N_1\gamma\tau}{h(c/\lambda_p)A_{core}} P_p \right); \\ \frac{\partial P_p}{P_p} &= -\sigma_{abs}(\lambda_p)N\gamma dz + \sigma_{abs}(\lambda_p)P_p\gamma \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)N_1\gamma\tau}{h(c/\lambda_p)A_{core}} \right) dz; \\ \int_0^L \frac{\partial P_p}{P_p} &= \int_0^L -\sigma_{abs}(\lambda_p)N\gamma dz + \int_0^L \frac{\partial P_p}{P_p} \frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)\gamma\tau}{h(c/\lambda_p)A_{core}} dz\end{aligned}$$

Hortaz, hurrengoa daukagu:

$$\ln \frac{P_p(L)}{P_p(0)} = -\sigma_{abs}(\lambda_p)N\gamma L - \frac{\sigma_{abs}(\lambda_p)\gamma\tau}{h(c/\lambda_p)A_{core}} [P_p(L) - P_p(0)] \quad (4.12)$$

(3.2) ekuazioa egoera geldikorrean kontsideratuz eta igorpenaren azkeneko terminoa (igorpen espontaneoekin erlazonaturikoa) mesprezatuz:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial Z} &= \sigma_{emi}(\lambda_k)N_2P\gamma - \sigma_{abs}(\lambda_k)N_1P\gamma; \\ \int_0^L \frac{\partial P}{P} &= \int_0^L [\sigma_{emi}(\lambda_k)N_2\gamma - \sigma_{abs}(\lambda_k)N_1\gamma] dz\end{aligned}$$

$P(L)$ askatuz gero:

$$P(L) = P(0) \exp \int_0^L [\sigma_{emi}(\lambda_k)N_2\gamma - \sigma_{abs}(\lambda_k)N_1\gamma] dz \quad (4.13)$$

Atarian $P(L)=P(0)$ dela kontsideratuz eta $N_1=N-N_2$ kontutan hartuz:

$$\gamma \int_0^L [\sigma_{emi}(\lambda_k)N_2 - \sigma_{abs}(\lambda_k)(N - N_2)] dz = 0$$

N konstantea dela kontsideratuz:

$$\int_0^L N_2 dz = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_k)NL}{\sigma_{emi}(\lambda_k) + \sigma_{abs}(\lambda_k)} \quad (4.14)$$

(4.10) ekuaziotik, hurrengoa lor dezakegu:

$$\int_0^L N_2 dz = \int_0^L \frac{\sigma_{abs}(\lambda_k) N_1 \gamma \tau}{h(c/\lambda_p) A_{core}} P_p dz = \frac{-\tau}{h(c/\lambda_p) A_{core}} [P_p(L) - P_p(0)] \quad (4.15)$$

Orain, (4.14) ekuazioko ezker-aldeko terminoa goiko espresioarekin ordezkaturaz gero:

$$\frac{-\tau}{h(c/\lambda_p) A_{core}} [P_p(L) - P_p(0)] = \frac{\sigma_{abs}(\lambda_k) NL}{\sigma_{emi}(\lambda_k) + \sigma_{abs}(\lambda_k)}$$

$$P_p(L) = P_p(0) - \frac{\gamma \sigma_{abs}(\lambda_k) NL}{\gamma \tau \left[\frac{\sigma_{emi}(\lambda_k) + \sigma_{abs}(\lambda_k)}{h(c/\lambda_p) A_{core}} \right]} \quad (4.16)$$

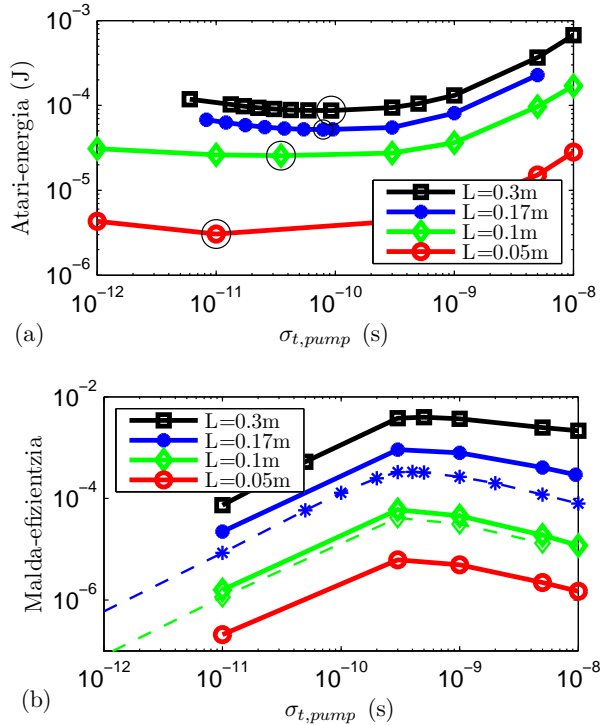
Azkenik, (4.12) ekuazioko $P_p(L)$ terminoa, goiko honekin ordezkaturaz:

$$P_p^{th} = \frac{A_{core} N \sigma_{abs}(\lambda_k) h(c/\lambda_p) L}{\tau [\sigma_{emi}(\lambda_k) + \sigma_{abs}(\lambda_k)] \left[1 - \exp \left(\gamma N \sigma_{abs}(\lambda_p) L \left(\frac{\sigma_{abs}(\lambda_k)}{\sigma_{abs}(\lambda_k) + \sigma_{emi}(\lambda_k)} - 1 \right) \right) \right]} \quad (4.17)$$

(4.17) ekuazioarekin bat eginez, 4.14(a) irudian zuntzaren luzera laburtzean atari-energia gutxiagotu egiten dela ikus daiteke. Erbioz dopaturiko zuntzen kasuan ere antzeko emaitza analitikoak demostratu dira [22],[23]. Edonola ere, dopante organikoekin dopaturiko PZOen kasuan, anplifikazioa askoz ere zuntz distantzia laburragoetan lor daiteke, dopante organikoen igorpen gurutze-sekzioak lur arraroek dituztenak baino askoz handiagoak baitira.

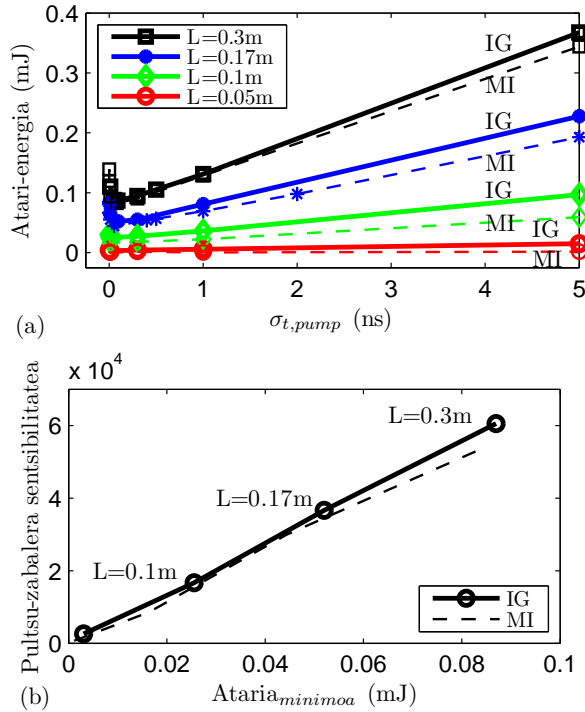
Kontsideraturiko zuntz-luzera desberdinetan, atari-energia minimizatzen duen pultsu-zabalera jakin bat dago, 4.14(a) irudiko kurba bakoitzean biribil batekin adierazita dagoelarik. Zuntzaren luzera laburtuz gero, atari-energia ere txikiagotu dezakegu. Hala eta guztiz ere, efizientzia handia nahi izanez gero zuntzaren luzera ezin da laburregia izan, luzera gehiegi txikitzen denean efizientziak gutxitzeko joera duelako [ikus 4.14(b) irudia]. Eboluzio hau MI eta IG zuntzetan ohikoa da, baina IG zuntzen kasuan malda-efizientziek balio altuagoak dituzte. Honen arrazoia, arestian aipaturiko gainjarpen-faktorea da, ohiko IG PZOen kasuan $\gamma = 1.43$ izaten da eta MI PZOen kasuan $\gamma = 1$. Ohiko IG PZOen β parametroa 0.02 izaten da, hau da, MI PZOen kasuan baino pixka bat txikiagoa (0.029). Diferentzia txiki honek azal dezake zergatik atari-energia minimoa lortzeko pultsu-zabalerak hain antzekoak diren

MI eta IG zuntzetan [ikus 4.15(a) irudia]. Edonola ere, argi eta garbi ikus daiteke malda-efizientzia hobea dela IG zuntzen kasuan [4.14(b) irudia], gainjarpen-faktore γ handiagoaren ondorioz.



4.14 irudia: (a) Atari-energiak ponpaketa pultsuaren zabaleraren menpe, luzera desberdinetako IG zuntzetan. (b) Aurreko kasuan erabilitako pultsu-zabalerara tartean lorturiko igorpen-efizientziak (lerro solidoak). Irudikaturiko bi marra-lerroek IG zuntzekin alderaturik, MI zuntzek efizientzia baxuagoa erakusten dute (*' 0.17 m eta '◇' 0.1 m).

Kontuan hartzeko beste gai bat, zuntz-luzera bakoitzerako ponpaketa zabalerarekiko sentsibilitatea da. Sentsibilitatea kuantifikatzeko asmoz, zuntz-luzera L guztientzako, atari-energiak ponpaketa-zabalerarekin gutxi gora-behera linealki hazten doala kontutan hartu da, L bakoitzarentzat malda desberdina delarik. Emaiztak 4.15(b) irudian irudikatu dira, MI eta IG zuntzen kasuetan. Kasu bietan sentsibilitatea distantziarekin hazten dela ikus daiteke eta IG PZOen kasuan sentsibilitatea pixka bat handiagoa dela ere ohar gaitzke.



4.15 irudia: (a) Linealki irudikatutako atari-energiaren eboluzioa ponpaketa pultsu-zabalerarekiko, IG zuntzen kasuan (lerro solidoa) eta MI zuntzen kasuan (marra-lerroa). (b) Pultsu-zabalerarekiko sentsibilitatea eta atari-energia minimoaren arteko erlazioa.

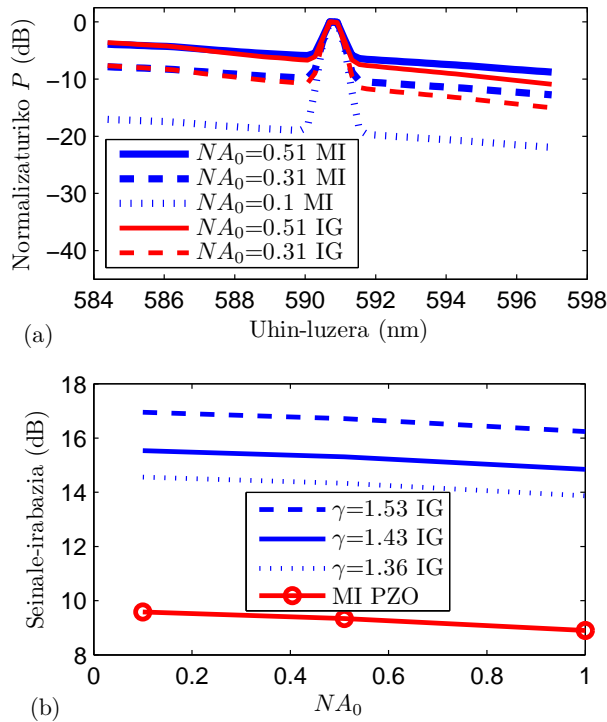
4.3 MI eta IG PZOzko Anplifikagailuen Seinale-irabazia

Hurrengo lerroetan zehar, zenbakizko irekidurak PZOzko amplifikagailuen irabazian duen eragina aztertuko dugu. Bigarren kapituluaz azaldu dugun bezala, amplifikagailu optikoen seinale-irabaziaren definizioan, ASE igorpenari dagokion potentziaren parte kenduta egiten da, hurrengo modu honetan:

$$G(\lambda) (dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}(\lambda) - P_{ASE}(\lambda)}{P_{s,in}(\lambda)} \right) \quad (4.18)$$

Formula honetan, $P_{s,in}(\lambda)$ sarrerako seinalearen potentzia da, λ uhin-luzeran zentratua. Zenbakitzailea amplifikaturiko seinale-potentziaren eta berzko igorpen amplifikatuaren hondo-potentziaren arteko aldea da, amplifikaturiko seinalea agertzen den uhin-luzera tartean. Beste hitz batzuekin esanda,

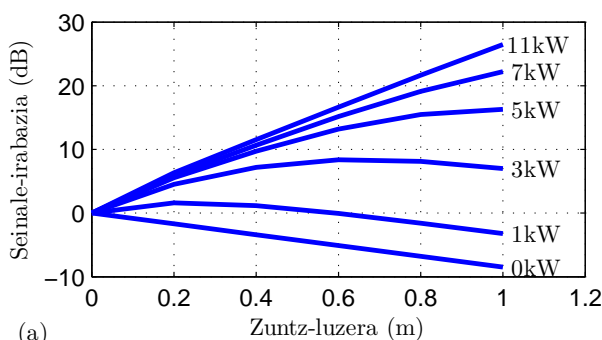
zenbakitzaila anplifikaturiko seinalearekin bakarrik erlazionaturik dagoen irteerako potentzia da.



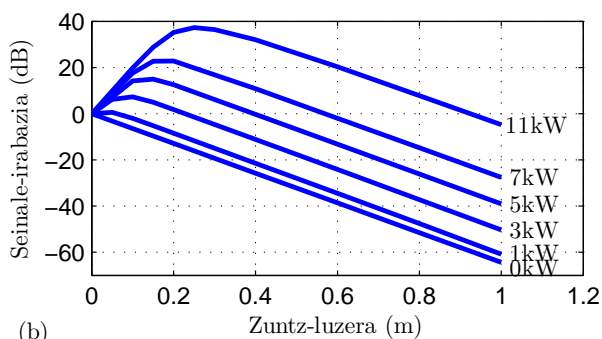
4.16 irudia: (a) Normalizaturiko potentzia espektralaren distribuzioa zenbakizko irekiduraren balio desberdinetarako, MI eta IG PZOetan. (b) Seinale-irabazia NA_0 -ren menpe, MI eta IG PZOetan. 4.I Taulako parametroak.

Lortutako emaitzek egoera erreal bateko emaitzen baliokideak izateko, PZOzko anplifikagailuekin esperimentalki erabilitako parametro berdinak erabiliz egin ditugu simulazioak [12],[17] (ikus 4.I Taula). 4.16(a) irudian ikus daitekeen bezala, ASE igorpenari dagokion irteerako potentzia handiagotu egiten da zenbakizko irekidura handiagotzen den heinean, bai MI PZOen kasuan eta baita IG PZOen kasuan ere ($\gamma = 1.43$). Honek, ardatzeko zenbakizko irekiduraren NA_0 handiagotzeak seinale-irabazian ondorio kaltegarriak izateko joera duela adierazten digu. N_1 eta N_2 -ren eboluzioetatik, *zarata faktorea* NF estima dezakegu [10], hau da, anplifikagailuaren berezko igorpen anplifikatuak seinaleari zenbateko zarata gehitzen dion. Errodamina B-rekin dopaturiko mota honetako anplifikagailuetan, NF 4 dB (zuntzaren luzera laburra denean) eta 10 dB (0.4 m-ko zuntz baten kalkulaturia) tartekoa izan daiteke [10]. Telekomunikazio aplikazioak garatzeko NF -ren balio hauek zentzudunak dira. Beste alde batetik, 4.16(b) irudiak, espero genuen bezala, IG zuntzetan γ -ren

balioa handituz gero, seinale-irabazi hobetu daitekeela erakusten du. γ -ren ohiko balio tartea kontuan harturik, hots, 1.36-1.53 [12],[19],[22], seinale-irabazian 2 dB inguruko desberdintasunak nabari daitezke NA_0 -ren edozein baliotarako. Seinale-irabazian γ parametroaren eragina nabaria den arren, hiru kurbek antzeko maldak dituzte, hau da, γ parametroaren eragina seinale-irabazian ez da zenbakizko irekidurarekin aldatzen. Bi motako zuntzen seinale-irabaziaz konparatuz gero NA_0 -ren balio berdinerako, IG PZOen kasuan lortzen den seinale-irabazia, SI PZOen kasuan lortutakoa baino handiagoa dela ohar gaitzke. IG PZOen kasuan irabazian lortutako hobekuntzak γ parametroaren balio altuagoak eragin handiagoa duela erakusten du, batez besteko zenbakizko irekidura baxuagoa izatea baino. Nabarmendu nahi dugu zenbakizko irekiduraren eragina askoz ere nabariagoa dela PZOzko laserretan PZOzko anplifikagailuetan baino. Izan ere, ASE igorpena laserretan erabilgarria da, baina ez seinale anplifikagailuetan.



(a)

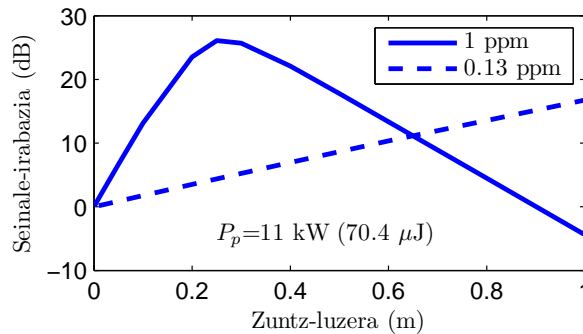


(b)

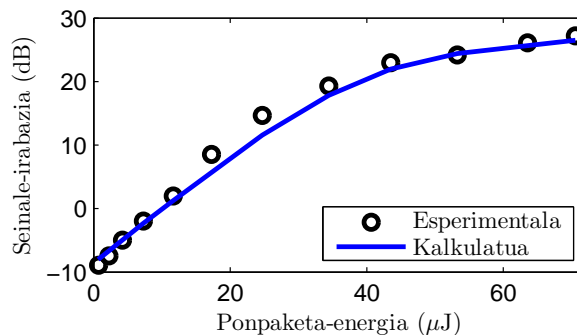
4.17 irudia: Seinale-irabaziaren eboluzioa 591 nm-tan zuntzaren luzeraren menpe, IG zuntzetan. Dopante molekulu dentsitatea (a) 0.13 ppm eta (b) 1 ppm da. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1.43$ eta $NA_0 = 0.51$.

Luzera optimoak (seinale-irabazi maximoa lortzen den zuntz-luzera) ponpaketa potentzia eta dopante kontzentrazio desberdinetarako 4.17 eta

4.18 irudietatik lor daitezke. Irudi hauek, seinale-irabaziek zuntzaren luzerarekiko duten menpekotasuna adierazten dute, IG eta MI zuntzen kasuan, hurrenez hurren. 4.17 irudian ikus daitekeen moduan, dopante kontzentrazioa handituz gero, irabazi handiagoa distantzia laburragoan lortzeko balio dezake, eta, ondorioz, distantzia optimoa laburtzeko ere. Adibidez, metro bateko luzera duen IG PZOzko anplifikagailuaren kasuan, 30 dB inguruko irabazia lor daiteke 0.13 ppm-ko kontzentrazioarekin [4.17(a) irudia], baina kontzentrazioa 1 ppm-ra aldatuz gero [4.17(b) irudia], 40 dB inguruko irabazia izatera hel gaitezke. 4.18 irudia simulatzeko 4.17 irudian erabilitako ponpaketa potentzia maximoa erabili da, eta MI PZOzko anplifikagailuekin lorturiko irabaziak IG anplifikagailuekin lorturikoak baino baxuagoak direla ikus dezakegu.



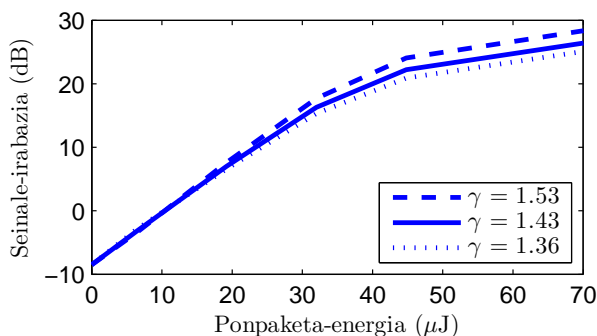
4.18 irudia: MI motako zuntzetan seinale-irabaziaren eboluzioa 591 nm-tan zuntzaren luzeraren menpe, bi kontzentrazio desberdin kontutan harturik. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1$ eta $NA_0 = 0.51$.



4.19 irudia: Seinale-irabaziaren emaitza esperimentalen [12] (biribilak) eta gure emaitza konputazionalen arteko konparaketa 591 nm-ko uhin-luzeran, ponpaketa-energia desberdinak kontutan harturik. Zuntzaren luzera 1 m da. 4.I Taulako parametroak.

4.17(a) irudiko irabazirik altuena (28 dB indurukoa) esperimentalki 11 kW ponpaketa potentzia erabilita lortu zen [12], hau da, 70.4 μJ ponpaketa

energiarekin. 4.19 irudian, aipaturiko emaitza esperimentalak eta gure emaitza konputazionalak marraztu ditugu, gure emaitzen egokitasuna demostratzeko. Irudian ondo ikusten den bezala, guk simulaturiko seinale-irabaziaz bat datoz espermentalki lortutakoekin. Saturazio efektuen ondorioz, irabazi altuagoak ezingo lirarteke lortu, Errodamina B-ren kontzentrazioa handitu ezean. Kontzentrazioa 0.13 ppm-tik 1 ppm-ra pasatzerakoan, 4.17(b) irudian ikusten den bezala, irabazi altuagoak lor daitezke, irabazi maximoa 25 cm-ko zuntz-luzeran lortzen delarik. Gure ereduak iragarri ezin duen gauzetako bat Errodamina B-ren kontzentrazio baxuekin anplifikazio egonkortasuna handiagoa dela da, [12] erreferentzian aipatzen den bezala. Beraz, gure simulazioak 0.13 ppm-ko kontzentrazioa kontuan harturik burutu dira, kontzentrazio altuagoak erabili beharrean. Ponpaketa potentzia maximoa 11 kW dela kontsideratu da, potentzia altuagoek tenplaketa (ingelesez *quenching*) eta beste efektu batzuk sor ditzaketelako.

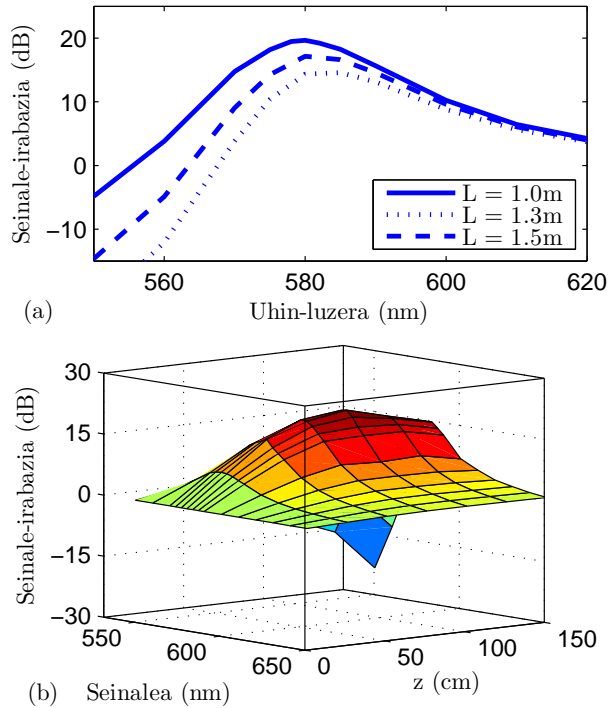


4.20 irudia: Seinale-irabaziaren aldaketak ponpaketa energiaren menpe, γ parametroaren hiru balio desberdinentzako. $\lambda = 591$ nm-ko uhin-luzeran eta $NA_0 = 0.51$. 4.I Taulako parametroak.

4.20 irudian γ balio desberdinetarako aurreko kalkulu berdinak errepikatatu ditugu, irabazia zenbat aldatzen den ikusteko asmoz. Emaitzak argiago erakusteko asmoz, ardatz horizontala energia unitateetan adierazi da, 4.17 irudiko potentzia tartearen baliokidetasuna mantenduz. Ikus daitekeen bezala, γ -rekiko irabaziaren aldaketak handiagoak dira ponpaketa energia handitzerakoan. 70 μJ ponpaketa energiarekin irabaziaz 3 dB-ko aldaketa jasotzen du γ parametroa 1.36-tik [22] 1.53-ra [19] handitzean.

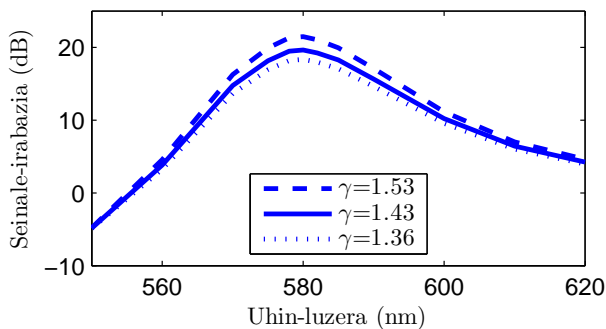
Orain arte erabili izan dugu seinalearen uhin-luzera 591 nm izan da. Balio hau irabazi maximoa lor daitekeen baliotik hurbil dago. Edonola ere, uhin-luzera optimoa zuntzaren luzeraren menpekoa da, 4.21 irudian ikus daitekeen moduan. 1 m baino zuntz luzeagoetan, zuntzaren luzeraren gehikuntzak zuntz-atenuazioren efektu erlatiboaren areagotzea sortzen du, uhin-luzera labu-

rangoetan nabariagoa delarik [ikus 4.21(b) irudia]. Honen ondorioz, zuntzaren luzera 1 m-tik 1.5 m-ra luzatzen denean, igorpen espektroa uhin-luzera luzeagoetara desplazatzen da, lehenengo atalean azaldu dugun bezala.



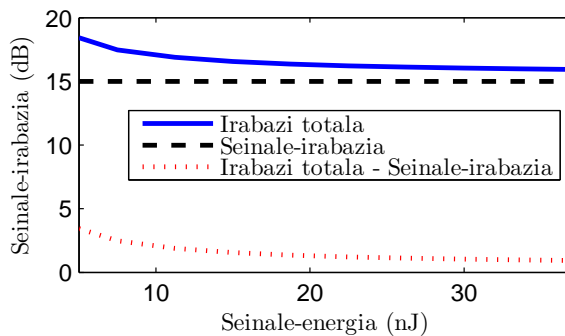
4.21 irudia: (a) Seinale-irabazia sarrerako seinalearen uhin-luzeraren menpe, zuntzaren luzera desberdinetarako. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulakoak dira, $\gamma = 1.43$ delarik. (b) 3 dimentsiotako irudiak, seinalearen uhin-luzerak (nm-tan) eta zuntzaren luzerak (cm-tan), seinale-irabazian duen eragina erakusten du.

4.22 irudian irabazia espektrala esperimentalki lorturiko 3 gainjarpen-faktoreen [12],[19],[22] menpe erakusten da. Lorturiko emaitzak, gutxi gorabehera 3 dB-tan alderatzen dira irabazi maximoa lortzen den uhin-luzeraren inguruan (581 nm). Ikus daitekeen bezala, seinalearen uhin-luzerak gainjarpen-faktoreak baino influentzia handiagoa du eta esperimentalki erabili den 591 nm-ko uhin-luzeran ez da irabazi maximoa lortzen.



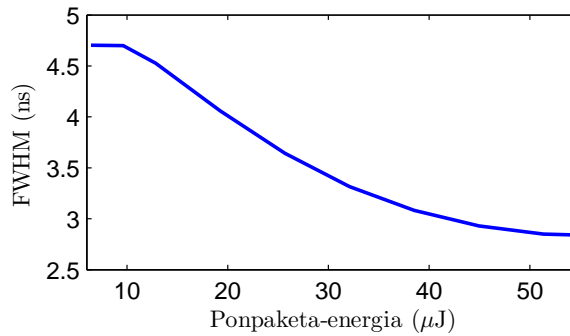
4.22 irudia: Seinale-irabazia sarrerako seinalearen uhin-luzeraren λ_s (nm-tan) menpe, esperimentalki lorturiko hiru gainjarpen-faktore desberdinentzako. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulako berdinak dira.

4.23 irudian, seinalearen energia handia egiten denean, irabazi totala gutxiagotu egiten dela ikus dezakegu, espero genuen bezala [23],[24]. Seinale-irabaziari dagokionez, ez du hainbesteko aldaketa pairatzen kontsideraturiko sarrerako energia tartean, eta irabazi totalaren balio bera izateko joera izaten du seinalearen energia altua denean. Irabazi bien arteko diferentzia irudiaren beheko aldean irudikaturik ikus daiteke.



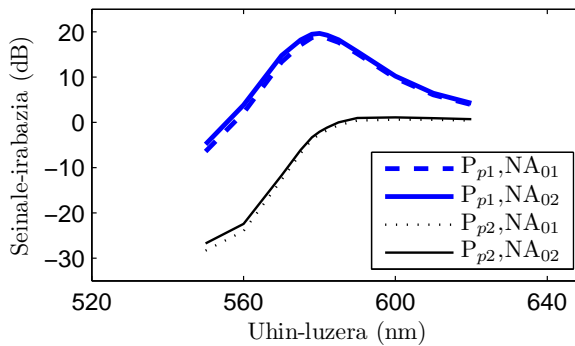
4.23 irudia: Irabazi totala (lerro solidoa) eta seinale-irabazia (marra-lerroa) seinale-potentiaren menpe 591 nm -tan. Irabazi totalarekiko diferentzia irudiaren beheko aldean ikus daiteke, puntu-lerroaren bitartez irudikaturik. Ponpaketa energia $32.1 \mu\text{J}$ da eta zuntzaren parametroak 4.I Taulako berdinak dira.

Anplifikaturiko pultsuaren zabalera tenporalari dagokionez (ikus 4.24 irudia), argi ikus daiteke seinale-pultsuaren estutze nabaria gertatzen dela ponpaketa-energia $10 \mu\text{J}$ -tik $50 \mu\text{J}$ -ra igotzen denean. Eboluzio berdina esperimentalki ere ikusi da [7].



4.24 irudia: Irteerako FWHM tenporalaren eboluzioa ponpaketa energiaren menpe. 4.I Taulako parametroak. $\gamma = 1.43$ eta $NA_0 = 0.51$.

Azkenik, 4.25 irudiak 2 kW eta 5 kW ponpaketa potentziekin kitzikatuturiko, eta NA_0 -ren bi balio desberdinentzako, zuntzaren seinale-irabaziaren eboluzioa seinale uhin-luzeraren menpe erakusten du. Ikus daitekeen bezala, NA_0 parametroaren igoerak ia ez du inolako eraginik seinale-irabazian eta ponpaketa potentziak eta seinalearen uhin-luzerak duten eragina baino askoz ere baxuagoa da.



4.25 irudia: Seinale-irabaziaren eboluzioa seinale-uhin-luzeraren menpe, ponpaketa-potentziaren bi balio desberdinentzako ($P_{p1} = 5$ kW, $P_{p2} = 2$ kW) eta NA_0 -ren bi balio desberdinentzako ($NA_{01} = 1$, $NA_{02} = 0.51$). $\gamma = 1.43$. 4.I Taulako parametroak.

4.4 Ondorioak

Kapitulu honetan dopaturiko MI eta IG PZOn amplifikazioaren ezau-garriak konputazionalki aztertu ditugu. Horretarako, guk diseinaturiko ad hoc algoritmo numerikoak erabili ditugu, aldagai independenteak hiru izan direlarik, hots, denbora, hedaturiko distantzia eta uhin-luzera (analisi espektralak egiten ahalbidetzen digu). IG zuntzen zenbakizko irekidura ez-uniformearen

eragina β parametroaren bitartez kontsideratu dugu. Ereduak, IG PZOen kasuan, dopante dentsitatearen eta potentzia-dentsitatearen distribuzio ez-uniformeen arteko teilkatzearen eragina ere kontutan hartzen du.

Lortu ditugun emaitza nagusiak modu honetan laburbildu daitezke: (i) Lehenik eta behin, MI PZOen kasurako dopanteen xurgapen eta igorpen gurutze-sekzioen gainjarpenak igorpen espektroaren desplazamenduan eta zabalaren duen eragina erakutsi dugu. Honi dagokionez, Errodamina B bezalako gainjarpen handia duten dopanteek, zuntzaren luzera egokiro aldatuz laser-igorpenaren espektroa sintonizatzeko balio dutela demostratu dugu; (ii) Zenbakizko irekidura handitzeak atari-potentzian (gutxiagotu) eta malda-efizientzian (handiagotu) eragin positiboa duela ere demostratu dugu, Errodamina B-rekin dopaturiko bai MI PZOetan eta baita IG PZOetan ere. Honez gain, laser-ataria minimizatzen duen ponpaketa pultsuaren zabalera temporal optimo bat dagoela ikusi dugu, eta beste alde batetik, igorpenaren malda-efizientzia maximizatzen duen beste zabalera optimo bat dagoela; (iii) PZOzko anplifikagailuei dagokienez, γ parametroa handitzen denean seinale-irabazia hobetzen dela erakutsi dugu. Aplikazioaren arabera, IG PZOzko anplifikagailuak edo MI PZOzko anplifikagailuak erabil daitezke, IG PZOzko anplifikagailuen kasuan irabaziaren balio hobegoa lortzeko aukera dugularik. Seinalearen uhin-luzera eta ponpaketa-potentzia optimoen eboluzioak, zuntzaren distantziarekiko, zuntzaren zenbakizko irekidurarekiko eta dopantearen distribuzio erradialarekiko ere aztertu ditugu, bai MI PZOetan eta baita IG PZOetan ere. MI eta IG PZOzko anplifikagailuetan, seinale-irabazia ez da zenbakizko irekidurarekin asko aldatzen.

Kapitulu honetan zehar erakutsitako analisiak PZOzko laser eta anplifikagailuen diseinurako oso erabilgarriak izan daitezke.

4.5 Erreferentziak

- [1] E. De la Rosa-Cruz, C.W. Dirk, A. Rodríguez eta V.M. Castaño. "Characterization of fluorescence induced by side illumination of rhodamine B doped plastic optical fibers," *Fiber Integr. Opt.*, vol. 20, pp. 457-464. 2001.
- [2] I.D.W. Samuel, B. Namdas eta G.A. Turnbull. "How to recognize lasing," *Nature Photonics*, vol. 10, pp. 546-549. 2009.
- [3] G.D. Peng, P.L. Chu, Z. Xiong, T.W. Whitbread eta R.P. Chaplin. "Dye-doped step-index polymer optical fiber for broadband optical amplification," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 2215-2223. 1996.
- [4] M. Rajesh, M. Sheeba, K. Geetha, C.P.G. Vallaban, P. Radhakrishnan eta V.P.N. Nampoore. "Fabrication and characterization of dye-doped polymer optical fiber as a light amplifier," *Applied Optics*, vol. 46, no. 1, pp. 106-112. 2007.
- [5] J.R. Lawrence, G.A. Turnbull eta I.D.W. Samuel. "Broadband optical amplifier based on a conjugated polymer," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 17, pp. 3036-3038. 2002.
- [6] A. Tagaya, S. Teramoto, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High-power and high-gain organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: Novel techniques for preparation and spectral investigation," *Applied Optics*, vol. 36, no. 3, pp. 572-578. 1997.
- [7] A. Tagaya, Y. Koike, E. Nihei, S. Teramoto, K. Fujii, T. Yamamoto eta K. Sasaki, "Basic performance of an organic dye-doped polymer optical fiber amplifier," *Applied Optics*, vol. 34, no. 6, pp. 988-992. 1995.
- [8] J. Arrue, F. Jimenez, M.A. Illarramendi, J. Zubia, I. Ayesta, I. Bikandi eta A. Berganza. "Computational analysis of the power spectral shifts and widths along dye-doped polymer optical fibers," *IEEE Photonics Journal*, vol. 2, pp. 521-531. 2010.
- [9] K. Geetha, M. Rajesh, V.P.N. Nampoore, C.P.G. Vallabhan eta P. Radhakrishnan. "Loss characterization in Rhodamine 6G doped polymer film waveguide by side illumination fluorescence," *J. Opt. A, Pure Appl. Opt.*, vol. 6, no. 4, pp. 379-383. 2004.

- [10] M. Karimi, N. Granpayeh eta M.K.M. Farshi. "Analysis and design of a dye-doped polymer optical amplifier," *Appl. Phys. B*, vol. 78, pp. 387-396. 2004.
- [11] R. Xia, G. Heliotis, Y. Hou eta D.D.C. Braddley. "Fluorene-based conjugated polymer optical gain media," *Organ. Electron.*, vol. 4, pp. 165-177. 2003.
- [12] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. "Theoretical and experimental investigation of Rhodamine B doped polymer optical fiber amplifiers," *IEEE Journal of quantum electronics*, vol. 31, no. 12, pp. 2215-2220. 1995.
- [13] M. A. Illarramendi, J. Zubia, L. Bazzana, G. Durana, G. Aldabaldetrekua eta J. R. Sarasua. "Spectroscopic characterization of plastic optical fibres doped with fluorine oligomers," *Journal of Light-wave Technology*, vol. 27, no. 15, pp. 3220-3226. 2009.
- [14] H.Z. Wang, F.L. Zhao, Y.J. He, X.G. Zheng, X.G. Huang eta M.M. Wu. "Low-threshold lasing of a Rhodamine dye solution embedded with nanoparticle fractal aggregates," *Optics Letters*, vol. 23, pp. 777-779. 1998.
- [15] S.Y. Lam eta M.J. Damzen. "Characterisation of solid-state dyes and their use as tunable laser amplifiers," *Applied Physics B*, vol. 77, pp. 577-584. 2004.
- [16] J. Clark, L. Bazzana, D.D.C. Bradley, J. Cabanillas-Gonzalez, G. Lanzani, D.G. Lidzey, J. Morgado, A. Nocivelli, W.C. Tsoi, T. Virgili eta R. Xia. "Blue polymer optical fiber amplifiers based on conjugated fluorene oligomers," *Journal of nanophotonics*, vol. 2, 023504. 2008.
- [17] A. Tagaya, T. Kabayashi, S. Nakatsuka, E. Nihei, K. Sasaki eta Y. Koike. "High gain and high power organic dye-doped polymer optical fiber amplifiers: absorption eta emission cross sections and gain characteristics," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, pp. 2705-2708. 1997.
- [18] G. Van Soest eta A. Lagendijk. " β factor in a random laser," *Phys. Rev. E*, vol.65, 047601. 2003.
- [19] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, Y. Koike eta Y. Okamoto. "Organic dye-doped polymer optical fiber laser," *Polym. Adv. Technol.*, vol. 11, pp. 612-616. 2000.

-
- [20] U. Scherf, S. Riechel, U. Lemmer eta R. Mahrt. "Conjugated polymers: Lasing and stimulated emission," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 5, pp. 143-154. 2001.
- [21] I. Ayesta, J. Arrue, F. Jiménez, M. A. Illarramendi eta J. Zubia. "Computational analysis of the amplification features of active plastic optical fibers," *Phys. Status Solidi A*, vol. 208, no. 8, pp. 1845-1848. 2011.
- [22] K. Sasaki eta Y. Koike. "Polymer Optical Fibre Amplifier" U.S. Patent 5,450,232, 12 September 1995.
- [23] Z. Zheng, H. Liang, H. Ming, Q. Zhang, Y. Yu, S. Liu, Y. Zhang eta J. Xie. "Rhodamine 6 G-doped polymer optical fiber amplifiers," *Chinese Opt. Lett.*, vol. 2, pp. 67-68. 2004.
- [24] D.P. Gang, P.K. Chu, Z. Xiong, T.W. Whitbread eta R.P. Chaplin. "Dye-doped step-index polymer optical fiber for broadband optical amplification," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 2215-2223. 1996.

5. Kapitulu

Karakterizazio Esperimentala

Laburpena— Zuntzaren nukleoko dopantearen distribuzioa kontuan harturik, polimero konjokatuekin dopaturiko polimerozko zuntz optikoen igorpen-espektoaren eta fotoegonkortasunaren karakterizazioa egin dugu. PZOen ohiko materialean txertaturiko lau polimero konjokatu desberdin aztertu ditugu. Besteak beste, kitzikapen uhin-luzerarekiko eta denborarekiko igorpenaren eboluzioa, kitzikapen-irradiantzia desberdinentzako aldaketa espektralak eta zuntzaren zeharreko propagazio distantziaren eragina daude egingako neurketen artean.

Dopante organikoekin edo polimero konjokatuekin dopaturiko PZOak arrakasta handia lortu dute laser, amplifikagailu eta konmutadore bezala erabiltzeko [1]-[5]. Hortaz, euren ezaugarri optikoen eta matrize ostalariaren eraginaren karakterizazio sakona egitea oso erabilgarria izan daiteke. Matrize desberdinetan txertaturiko polimero konjokatuaren karakterizazio esperimentalaren inguruko publikazio asko dagoeneko badagoen arren [5]-[8], oso lan gutxi egin da PZOekin.

Kapitulu honetan zehar, PZOetan txertaturiko hainbat polimero konjokatuaren ezaugarri optikoak ikertuko ditugu, albo-kitzikapen teknika erabilia (femto-segundoko laser-pultsuen bitartez) [9],[10]. Alde batetik, PZOek gailu optiko bizkorrak garatzeko balio dute eta pultsu ultra-bizkorrekin kitzikatuz gero, beharrezkoak diren dopaturiko PZOen ezaugarrien ezagutza hobea izatea lor genezake. Beste alde batetik, PZOetan oinarrituriko sentsoareak eta amplifikagailuak eraiki daitezke [11],[12]. Kapitulu honetan, dopantearen, kitzikapen uhin-luzeraren eta zuntzan zeharreko propagazio distantziaren menpeko igorpen-espektoak ikertu ditugu. Fotoegonkortasun ezaugarrien inguruan ere iker-

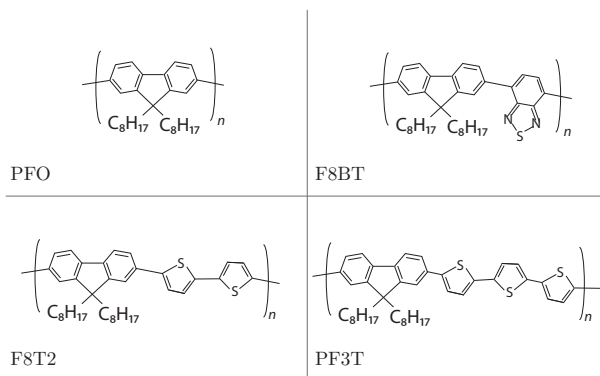
keta sakona egin dugu, dopaturiko PZOak laser bidez kitzikatzen direnean igorpen fluoreszentzian gertatzen diren aldaketak karakterizatzeko asmoz. AFM (ingelesez, *Atomic Force Microscopy*) faseko irudiak eta TEM (ingelesez, *Transmission Electron Microscopy*) irudiak atera ditugu PMMA matrizean dopantearen distribuzioa nolakoa den aztertzeko. Kapituluaren zehar demostratuko den bezala, dopantearen distribuzioak PZO aktiboen ezaugarri optikoetan eragin aipagarria du.

Kapituluaren egitura hurrengoa da. Lehenengo, 5.1 atalean gure neurketak egiteko erabilitako teknika esperimentalak aurkeztuko dira. Honen ondoren, 5.2 atalean, kontsideraturiko lau PZO dopatuen ezaugarri espektroskopikoak analizatu eta aztertuko ditugu. Azkenik, 5.3 atalean, hainbat ondorio laburbilduko dira.

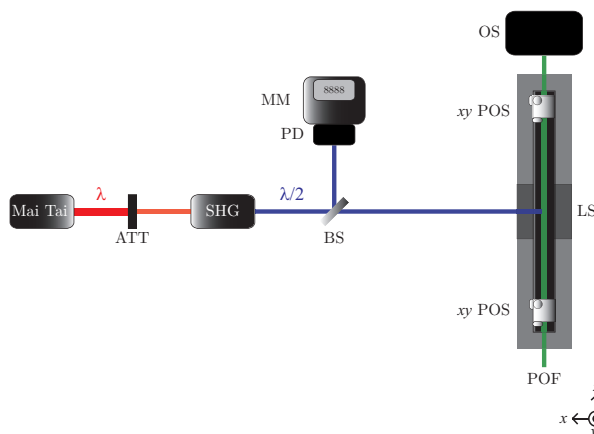
5.1 Esperimentua

Ondorengo neurketak, lau polimero konjokatu desberdinekin dopaturiko eta PMMA materialarekin egindako maila-indizeko PZOekin egin dira. Zehatzagoak izateko, dopanteak poli(9,9-dioktilfluorenoa) (PFO), poli(9,9-dioktilfluoreno)-alt-bentzotiadiazolea (F8BT), poli(9,9-dioktilfluoreno)-alt-bitiofenoa (F8T2) eta poli[2,7-(9,9-bis(2'-etilhexil)fluoreno)-alt-2,5-tertiofenoa] (PF3T) izan dira. Bakoitzaren egitura molekularra 5.1 irudian ikus daiteke. Kasu guztietan, zuntzaren nukleoko dopantearen kontzentrazioa 0.003 wt% da, eta estaldurako materiala dopatu gabekoa da. Zuntzaren diametroa 1 mm da, nukleoren diametroa 980 μm , eta estalduraren lodiera 10 μm . Dopaturiko zuntz hauek Luceat S.P.A (Italia) PZO fabrikatzaileak egindakoak dira eta fabrikazioaren inguruko xehetasunak hurrengo erreferentzian aurki daitezke [13]. Zuntz-laginek 30-40 cm-ko luzera zuten eta zuntzaren muturrak eskuz leundu ziren, lizpapperak erabilia.

Espektro optikoak neurtzeko erabilitako konfigurazioa 5.2 irudian ikus daiteke, non albo-argiztapen teknika erabili izan zen [9],[10]. Zuntz aktiboak kitzikatzeko erabilitako argi-iturria Mai Tai HP laser sistema (~100 fs pultsu-zabalerak, 300 kW potentzia maximoak, 2.5 W batatz besteko potentzia, 80 MHz maiztasuna) izan zen, frekuentzia doblatzaile unitate batekin (Inspire Blue) 345-520 nm tartean kitzikatu ahal izateko. Laserraren irteerako atenuadore aldakorra eskuz doitu, irradianzia kitzikatzailea kontrola genezakeen.



5.1 irudia: PZOzko laginetan txertaturiko lau polimero konjokatuen egitura molekularra.



5.2 irudia: Dopaturiko PZOen igorpen espektroak neurtzeko erabiliko konfigurazio esperimentalak. ATT: Atenuadore aldatkorra; SHG: Inspire Blue bigarren harmoniko sortzailea; BS: argi-sorta banatzailea; PD: fotodetekttagailua; MM: multimetroa; LS: motor lineala; xy POS: xy mikroposizionatzaileak; OS: espektrometro optikoa.

Neurtu beharreko zuntz dopatuak, motor lineal baten gainean muntaturiko bi xy mikroposizionatzaileen bitartez oratu ziren. Hauek zuntzaren lan-eremua guztiz horizontal mantentzeko eta laser erasotzailea zuntzaren zentroan fokatzeko erabili ziren. Ez zen inolako mikroskopia objektiborik erabili behar izan, laser-sistemako seinaleak kolimazio nahikoa baitzuen zuntzaren irteeran fluoreszentzia-seinale altua lortzeko. Neurketarik gehienetan, kitzikatzeko puntuaren eta zuntzaren muturraren arteko distantzia konstante mantendu zen (16 cm). Zuntzetan zehar propagazio distantziaren menpeko neurketak egin behar izan zirenean, ESP300 mugimendu kontrolatzailearen bidez gidaturiko ILS250CC motor lineala erabili zen. Zuntzaren muturrean lorturiko igorpen espektro guztiak, USB4000 espektrometroarekin (1.5 nm-ko FWHM erresoluzioa) neurtu ziren eta lorturiko emaitzak detekzio-sistemaren erantzuna

konpentsatzeko zuzendu ziren. Honez gain, erreferentzia seinale bat erabili zen, argi-sorta banatzaile (ingelesez *beam splitter*) bat erabilia, laserraren fluktua-zio posibleak baliogabetzeko. Guk eginiko LabVIEW programa erabili zen, alde batetik, mugimendu kontrolatzailea eta espektrometroa automatizatzen, eta, bestetik, neurketetan zehar sinkronizazio egokia lortzeko. Dopaturiko zuntzen xurgapeneko espektroak neurtzeko zuntz optiko akoplagailuarekin ekipaturiko Cary 50 UV-Vis espektrometroa erabili zen. Neurketa hauetan, zuntzaren luzera nahiko laburra izan zen (1 cm) zuntzen nukleoetan txertaturiko dopanteen xurgapeneko bandak detektatzeko.

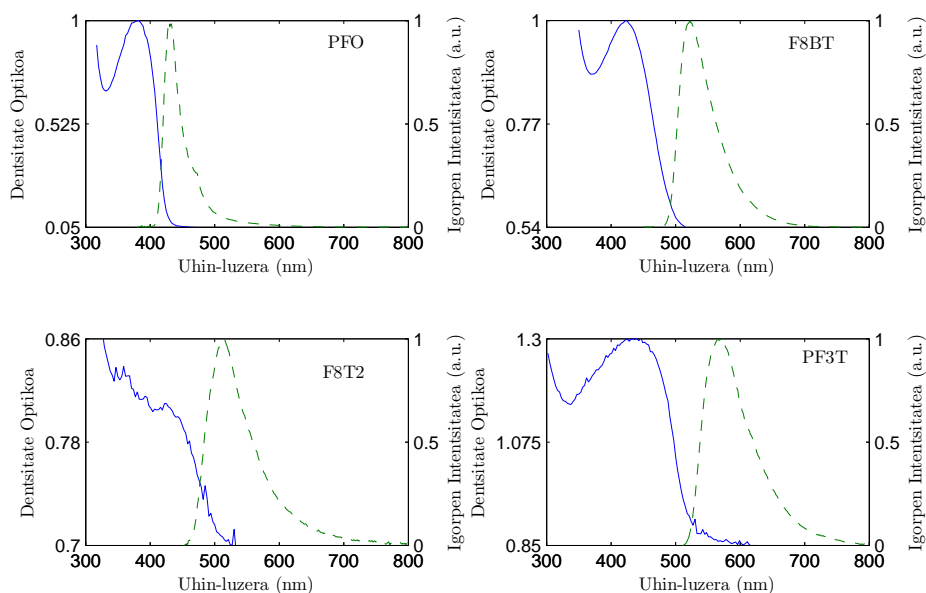
Arestian aipatu legez, dopanteen distribuzioak PZO aktiboen ezaugarri optikoetan eragin zuzena dauka. Dopante bakoitzak PMMA materialean duen distribuzioa zein den jakiteko, AFM eta TEM irudiak erakutsiko dira. AFM teknika guztiz erabilgarria izaten da dopaturiko PZOak bezalako material heterogeneoak karakterizatzen. Gainazaleko egituraren existentzia diren osagai individualen biskoelastikotasuna, itsaspena, etab. bezalako ezaugarri fisikoen informazioa ematen du, nanometroko eskalan. Beraz, irudi hauek oso baliagarriak dira PMMA matritzetik dopanteak bereizteko. AFM neurketak eskaner batekin hornituriko Nanoscope III Multimode –Bruker– mikroskopioarekin egin ziren. Irudiak siliziozko mentsula estandarren bitartez (254-321 kHz erresonantzia maiztasuna eta $20\text{-}80\text{ Nm}^{-1}$ malguki konstantea) *tapping* moduan eskaneatuz eskuratu ziren. Altura eta fase irudiak aldi berean hartu ziren, giro-tenperaturan eta 0.5 Hz-tan. Lagin bakoitzaren azalera LEICA EM UC6 mikrotomoarekin prestatu eta etanolarekin garbitu ziren neurketak egin aurretik.

AFM teknika gainazalak, barrukoa ez, karakterizatzen den heinean, TEM teknika osagarria ere erabili izan da. TEM mikroskopioetan, elektro-sorta bat laginaren xafla oso mehe batetik transmititzen da, zeharkatzen duen materialari eragiten diolarik. Elektroiek xaflaren lodiera osoan dauden konposatu desberdinekin dispersio desberdina izan ostean, kontraste-irudia sortzen da. Hau honela izanik, TEM teknikak PMMA matrizean zeharreko dopante distribuzioa identifikatzea ahalbidetzen digu, hau da, laginaren lodiera osoko dopantearen distribuzioa. Erresoluzio handiko eta LaB6 filamentuarekin hornituriko TEM mikroskopioa (TECNAI G2 20 TWIN) erabili zen dopaturiko lau zuntzen irudiak lortzeko. Laginak LEICA EM UC6 mikrotomoarekin prestatu ziren.

5.2 Emaitzak eta Eztabaida

5.2.1 Analisi Espektroskopikoa

5.3 irudian ultramore-hurbilean eta alde ikusgaian kokaturiko dopaturiko zuntzen xurgapeneko espektroak ikus daitezke. Dopante bakoitzaren xurgapen maximoa kokatzen den uhin-luzera 5.I Taulan zerrendatu dira. Ikus daitekeen moduan, F8T2 eta PF3T dopanteekin dopaturiko zuntzen xurgapen maximoa uhin-luzera luzeagoetan kokatzen da (440 nm bi kasuetan).



5.3 irudia: PFO, F8BT, F8T2 eta PF3T dopanteekin dopaturiko PZOen xurgapeneko (lerro solidoa) eta igorpeneko (marra-lerroa) espektroak. Igorpen-espektroa lortzeko lagin bakoitza bere xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikatu da, 16 cm-ko zuntz-luzeran.

5 I TAULA: POLIMERO KONJOKATUEKIN DOPATURIKO PZOEN XURGAPEN ETA IGORPEN EZAUGARRIAK.

Dopantea	Xurgapen maximoa (nm)	Igorpen maximoa (nm)	Igorpen FWHM (nm)	Stokes desplazamendua (nm)	Gainjarpen tartea (nm)
PFO	380	428	28,7	48	410-425
F8BT	425	522	60,6	97	485-500
F8T2	440	514	76,1	74	460-500
PF3T	440	572	82,7	132	520-600

5.3 irudiak xurgapeneko maximoko uhin-luzeran kitzikaturiko PZO aktibo bakoitzaren igorpen-espektroak ere erakusten ditu. Dagozkien igorpen-maximoko uhin-luzerak 5.I Taulan zerrendatu dira era berean. Ikus daitekeen moduan, PFO eta PF3T molekulekin dopaturiko zuntzek igorpeneko uhin-luzera laburrena eta luzeena aurkezten dute, hurrenez hurren. F8BT eta F8T2 dopantearekin dopaturiko zuntzen igorpenak espektroaren eskualde berdean kokatzen dira, hots, PMMA materialaren atenuazio baxuko leihoan. 5.I Taulak, honez gain, lagin guztien igorpen-espektroen FWHMa, Stokes desplazamendua (xurgapeneko eta igorpeneko maximoen arteko banaketa) eta xurgapeneko eta igorpeneko espektroen arteko gainjarpen-tartea erakusten ditu. Aipagarria da PF3T dopantearekin dopaturiko zuntzak aurkezten duela Stokes desplazamendu handiena, eta, era berean, gainjarpen handiena. Ezaugarri hau matrizearen eta dopante materialaren elektroien arteko interakzio bi-brazional handiagoaren ondorioa da [14],[15]. Ikusiko den bezala, igorpeneko eta xurgapeneko espektroen arteko gainjarpenak eragin zuzena dauka zuntzaren zeharreko propagazio-distantziaren menpeko igorpen espektroaren aldaketan.

Zuntz bakoitzarentzako kitzikapen uhin-luzeraren menpeko igorpen-espektroak neurtu ditugu, beti ere, argi-propagazio distantziak konstante mantenduz. Lorturiko espektroak simetrikoak ez direnez, igorpen espektroen lehenengo eta bigarren momentuak aztertu ditugu, W_1 eta W_2 , hurrenez hurren. Lehenengo momentuak batuz besteko igorpeneko uhin-luzera adierazten du, eta hurrengo modu honetan kalkula daiteke:

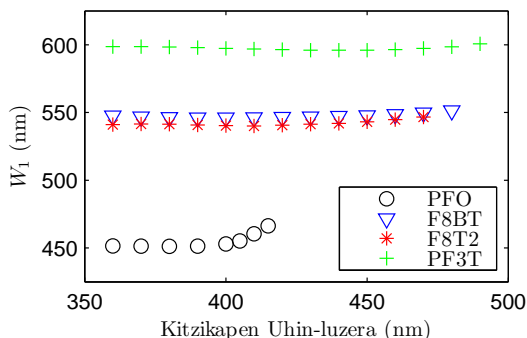
$$W_1 = \int I(\lambda) \lambda d\lambda / \int I(\lambda) d\lambda \quad (5.1)$$

Bigarren momentuaren erro karratua zabalera espektralaren proportzionala da, eta hurrengo modu honetan kalkula daiteke:

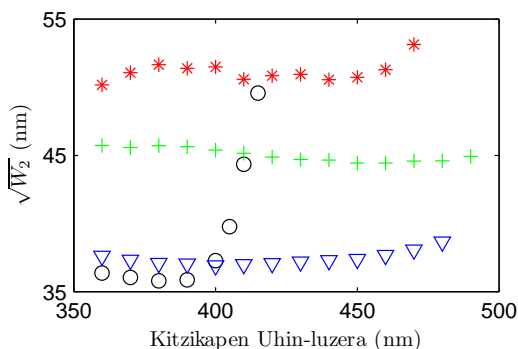
$$\sqrt{W_2} = \sqrt{\frac{\int (W_1 - \lambda)^2 I(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda) d\lambda}} \quad (5.2)$$

5.4 eta 5.5 irudiek, azterturiko zuntz dopatu bakoitzarentzako, kitzikapen uhin-luzeraren menpeko W_1 eta $W_2^{1/2}$ -ren eboluzioak erakusten dituzte, hurrenez hurren. Ikus daitekeen moduan, PFO eta F8T2-rekin dopaturiko zuntzek jasotzen dituzte aldaketa espektralik nabariena. Aipamen berezia merezi du PFO laginean W_1 -en eta $W_2^{1/2}$ -ren eboluzioan gertatzen diren bat-bateko aldaketak 400 nm-ko kitzikapen uhin-luzeraren inguruan. F8T2-rekin dopaturiko zuntzaren kasuan, aldaketa espektralak pittin bat txikiagoak dira,

eta F8BT eta PF3T duten bi zuntzen kasuan, aldaketa espektralak ia ohartezinak dira. PFO eta F8T2 laginetan ikusten diren aldaketa espektralek, zuntzen fabrikazioa prozesuan dopante hauek homogeneousotasun gutxirekin disolbatu direla iradokitzen dute. Hipotesi hau kapitulu honetan zehar AFM eta TEM irudien bitartez egiaztatuko da.



5.4 irudia: PFO, F8BT, F8T2 eta PF3T dopanteekin dopaturiko PZOen W_1 -en eboluzioa kitzikapen uhin-luzeraren menpe. Kasu guztietan kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta argiaren propagazio distantzia 16 cm.

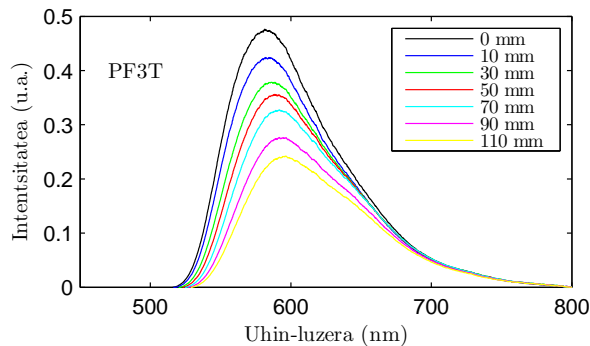


5.5 irudia: PFO (o), F8BT (V), F8T2 (*) eta PF3T (+) dopanteekin dopaturiko PZOen $W_2^{1/2}$ -en eboluzioa kitzikapen uhin-luzeraren menpe. Kasu guztietan kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta argiaren propagazio distantzia 16 cm.

5.2.2 Propagazio Distantziaren Eragina Igorpeneko Espektoan

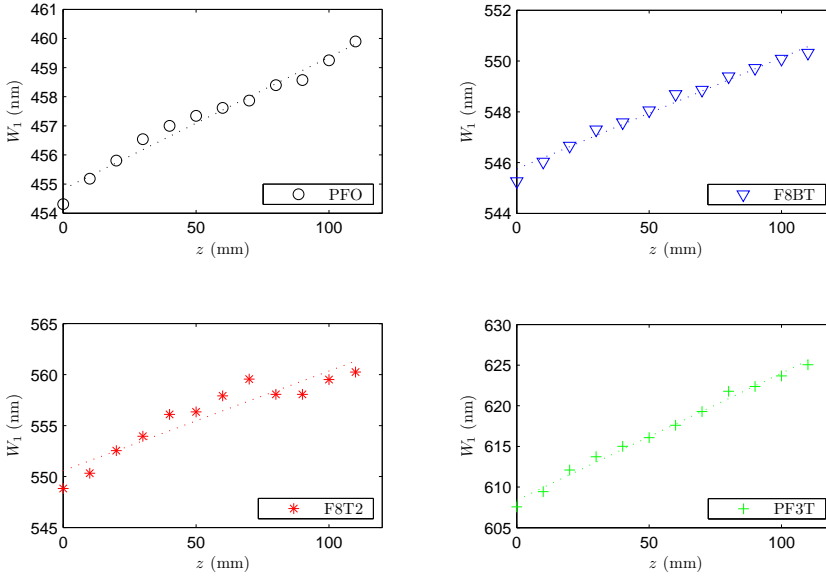
Dopaturiko zuntz bakoitzarentzako igorpen-espektoen eboluzioa z argi-propagazio distantziaren menpe aztertu da, zuntz bakoitza bere xurgapen maximoan kitzikatu delarik (ikus 5.I Taula). 5.6 irudiak distantzia desberdinetan kitzikatzean PF3T-rekin dopaturiko zuntzaren igorpen-espektoak erakusten ditu. Kitzikapen-puntua detektoretik urruntzen den heinean, igorritako

intentsitatea gutxiagotu egiten da, eta, bai uhin-luzera maximoa, eta baita lehenengo momentua ere, uhin-luzera luzeagoetarantz desplazatzen dira. 4. Kapituluaren ikusi dugun bezala, desplazamendu hauek igorpeneko eta xurgapeneko espektroen gainjarpenarekin erlazio zuzena daukate [16]. Hau hobeto ulertzeko, kontuan hartu behar da gainjarritako eskualdearen igorpenaren parte birxurgatu egiten dela, eta, ondorioz, gainjarritako eskualdeko uhin-luzera labur horiek, atenuazio gehiago pairatzen dutela. Hau horrela izanik, gainjarpen handia duten dopaturiko zuntzek gorriranzko desplazamendu handiagoa pairatuko dute propagazio distantzia luzatzean. Efektu hau 5.7 irudiko emaitzetan argi eta garbi ikus daiteke. Bertan, propagazio-distantzia desberdinetarako igorpeneko espektroen lehenengo momentuen eboluzioak adierazten dira. Kasu guztietan, argi-propagazio distantzia luzatzen den heinean, lehenengo momentuaren gorriranzko desplazamendu ia lineala gertatzen da.



5.6 irudia: PF3T-rekin dopaturiko zuntzaren igorpeneko espektroaren eboluzioa argi-propagazio distantziarekiko, kitzikapen uhin-luzera 440 nm eta irradianzia 0.97 Wcm^{-2} den kasu konkreturako.

5.II Taulan, 5.7 irudiko kurba esperimentalen doiketa linealetik lorturiko maldak eta mugatze-koefizienteak (R^2) ikusteaz gain, xurgapen-igorpen gainjarpenen balioak ere ikus daitezke. Taulako informazioari so eginez, maldak gainjarpenarekin erlazio lineala duela ikus dezakegu. Gainjarpen handiagoa duten laginen kasuan gorriranzko desplazamendu handiagoa esperimentalki aurkitzean, 4. Kapituluaren azaldutako analisi teorikoa baieztatzen dugu. Aipatu dugun bezala, azterketa hau oso garrantzitsua da PZOzko laserretan eta aplikagailuetan, sintonizatu daitekeen uhin-luzera tartea zein den jakiteko. Beste alde batetik, 5.II Taulan ikus daitekeen moduan, PFO eta F8T2 polimeroekin dopaturiko zuntzetan mugatze-koefizienteen balioak baxuagoak dira, PMMA matrizean dopanteak homogeneotasun txikiagoa izatearekin erlazionaturik egon daitekeelarik.



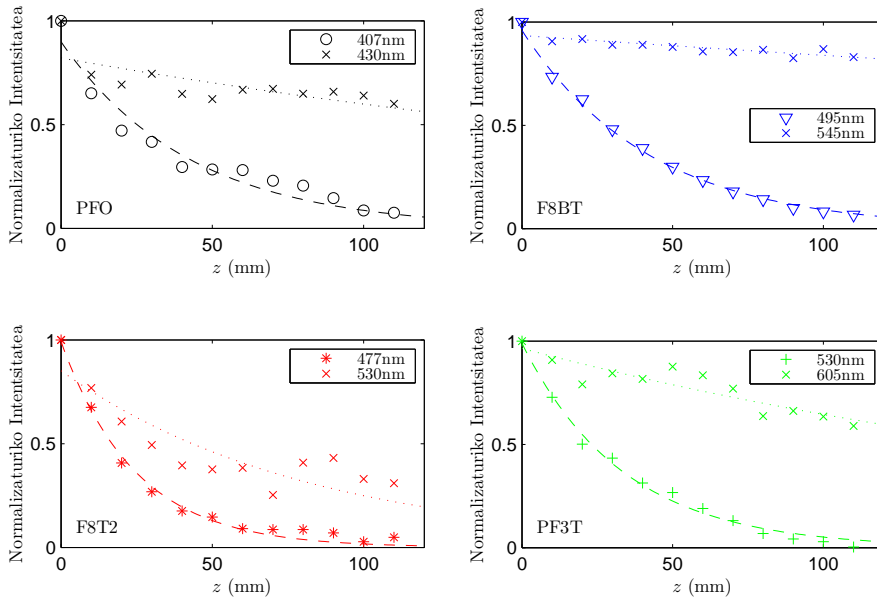
5.7 irudia: Xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikaturiko zuntzen lehenengo momentuaren eboluzioa propagazio distantziaren menpe. Kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} . Detektoretik hurbilen zegoen zuntzaren puntua, zerora normalizatu da. Doiketa linealak puntu-lerroen bitartez egin dira.

5 II TAULA: DOPATURIKO ZUNTZ BAKOITZARENTZAKO LEHENENGO MOMENTUAREN EBOLUAZIOAREN MALDA, MUGATZE-KOEFIZIENTEA, ETA XURGAPENEN ETA IGORPENEN ESPEKTROEN ARTEKO GAINJARPENA, ARGIPROPAGAZIOAREN FUNTZIO.

	Malda (nm/mm)	R^2	Gainjarpena (nm)
PFO	0,045	0,958	15
F8BT	0,044	0,984	15
F8T2	0,098	0,880	40
PF3T	0,156	0,990	80

Argizaturiko zuntzaren zatia argi-iturri homogeneous (uhin-laua) dela kontsideraturik eta irradianzia baxuekin kitzikatuz gero, z propagazio distantzia zeharkatu ostean zuntzaren irteeran neurtutako argia (λ uhin-luzeran) hurrengo moduan adieraz daiteke [9]:

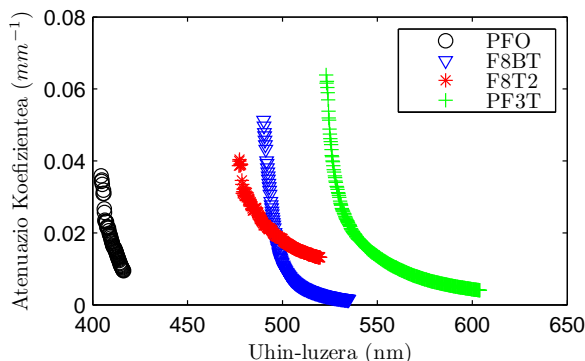
$$I(z, \lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)z] \tag{5.3}$$



5.8 irudia: Igorpeneko uhin-luzera desberdinetan z -ren menpeko transmitituriko intentsitatearen eboluzioa. Kitzikapena: uhin-luzera dopante bakoitzaren xurgapeneko maximoan eta 0.97 Wcm^{-2} irradiantziarekin. Marra- eta puntu-lerroak (5.3) ekuazioa doitzen lortu dira, $R^2 = 0.9491$ (407 nm-tan) eta $R^2 = 0.5313$ (430 nm-tan) PFO laginean, $R^2 = 0.9937$ (495 nm-tan) eta $R^2 = 0.6919$ (545 nm-tan) F8BT laginean, $R^2 = 0.9906$ (477 nm-tan) eta $R^2 = 0.7739$ (530 nm-tan) F8T2 laginean, eta $R^2 = 0.9920$ (530 nm-tan) eta $R^2 = 0.8175$ (605 nm-tan) PF3T laginean izanik.

(5.3) ekuazioan, $I_0(\lambda)$ espektroaren intentsitatea da, $z = 0$ posizioan, eta $\alpha(\lambda)$ atenuazio koefizientea da. Espresio honek argia zuntzetik zehar nola hedatzen den deskribatzen du, $\alpha(\lambda)$ -ren goi-limitea emanez. $\alpha(\lambda)$ -ren behe-limitea puntu-iturri ereduak kontuan harturik lortuko litzateke. Kasu honetan, z distantzia hedatu ostean, argi-intentsitatea desberdina izango litzatekeen beste espresio baten bitartez deskribatuko litzateke [9]. Bi ereduak konparatuz gero, lortutako balioen arteko aldea %10 baino baxuagoa izango litzateke [10]. (5.3) espresioa ondo doitzen da dopanteen xurgapeneko espektroen isatseko uhin-luzera tartean, hau da, igorpen eta xurgapen espektroen arteko gainjarpen tartearen barnean eta inguru hurbiletan. Tarte honetatik kanpo, espresioa ez da ondo doitzen birxurgapen eta berrigorpen efektuen ondorioz [17]. Ideia hau ondo argitzeko asmoz, 5.8 irudian dopaturiko zuntz bakoitzarentzako argiaren hedapen-distantziaren menpeko transmitituriko igorpen-intentsitateak irudikatu dira, uhin-luzera desberdin bi kontuan harturik. Kasu guztietan, kontsideraturiko uhin-luzeretako bat gainjarpen tartearen barnean kokatu da, eta bestea kanpoan. Gainjarpenaren barnean kokaturiko uhin-luzeran, transmitituriko intentsitateak portaera esponentzial argia murrizten du, lagin bakoitzarentzako lorturiko mugatze-koefizienteek ondo adierazten duten moduan. Gain-

jарpen tartetik kanpo, transmitituriko intentsitateak ez du portaera esponenziala jarraitzen, uhin-luzera laburragoetan xurgaturiko argiaren berrigorpenaren ondorioz. Uhin-luzera tarte egokian, z -rekiko transmitituriko intentsitateak (5.3) espresioarekin doitu dira, atenuazio-koefizienteak lortzeko asmoarekin. Aztertuturiko lagin bakoitzaren koefizienteak 5.9 irudian erakusten dira.



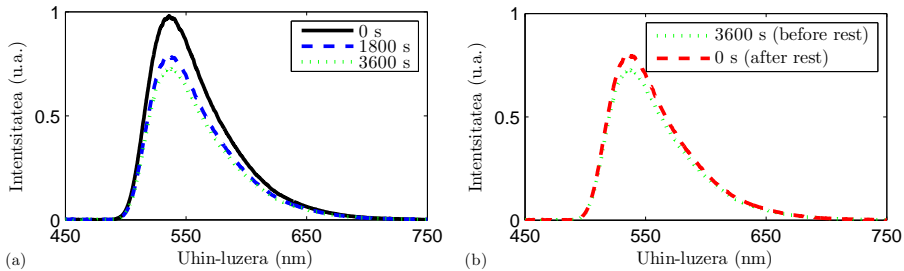
5.9 irudia: Dopaturiko lau zuntzen atenuazio-koefiziente linealak. Kasu bakoitzean kitzikapen uhin-luzera xurgapeneko maximoan kokatu da eta kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da.

5.2.3 Fotoegonkortasuna

Hurrengo lerroetan femtosegundoko laser pultsuekin kitzikaturiko PZO aktiboen fotoegonkortasuna izango dugu hizpide. 5.1 atalean azaldutako kitzikatze-baldintzak aplikatuz gero, kitzikatze-denboraren menpeko igorpen-intentsitatearen beherakada gertatzen dela ohartu gara (ikus F8BT laginaren adibidea 5.10 irudian). Beherakada hau desberdina izan da dopaturiko zuntz bakoitzarentzako. Honez gain, espektralki ez da uniformeki gertatu, igorpen bandetan W_1 -en eta $W_2^{1/2}$ -ren desplazamenduak ikusi ditugularik. Aurreko ataletan erakutsitako neurketa guztietan, efektu hau kontuan hartu da neurketa bakoitza egin aurretik, zuntza bere igorpen espektroan egonkortasuna lortu arte kitzikatu delarik.

Dopaturiko zuntz optikoen fotoegonkortasuna karakterizatzeko asmoz, lehenengo pausu batean, 60 minututan zehar baldintza berdinak erabilia kitzikatu ditugu. Zehatzagoak izateko, kitzikapen uhin-luzera, kasu bakoitzean, bere xurgapeneko maximoan kokatu da eta kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da. Fotoegonkortasunaren eta igorpen-espektoen W_1 -en eta $W_2^{1/2}$ -ren emaitzak 5.11(a), 5.11(c) eta 5.11(e) irudietan ikus daitezke. Aurreko kasuan erabilitako baldintzak aplikatuz baina 24 orduko atsedenaldiaren ostean 5.11(b), 5.11(d) eta 5.11(f) irudietan magnitude berdinen eboluzioa ikus daiteke. Hau da, lehenengoko kitzikatze tartearen ostean, zuntzak iluntasunean

gorde dira 24 orduz giro-tenperaturan. Lehenengo kitzikatze tartean, lau zuntzak ez dira inoiz laser-argiarekin kitzikatuak izan, beraz, ez da inolako alde zurreko degradaziorik egon. Bigarren kitzikatze tartean, zuntza aurreko kitzikatze tartean erasotako puntu berean kitzikatu da. Zuntz desberdinen eboluzioak hobeto konparatu ahal izateko, lehenengoko kitzikatze tarteko hasierako fluoreszentzia intentsitateak %100ra normalizatu dira.

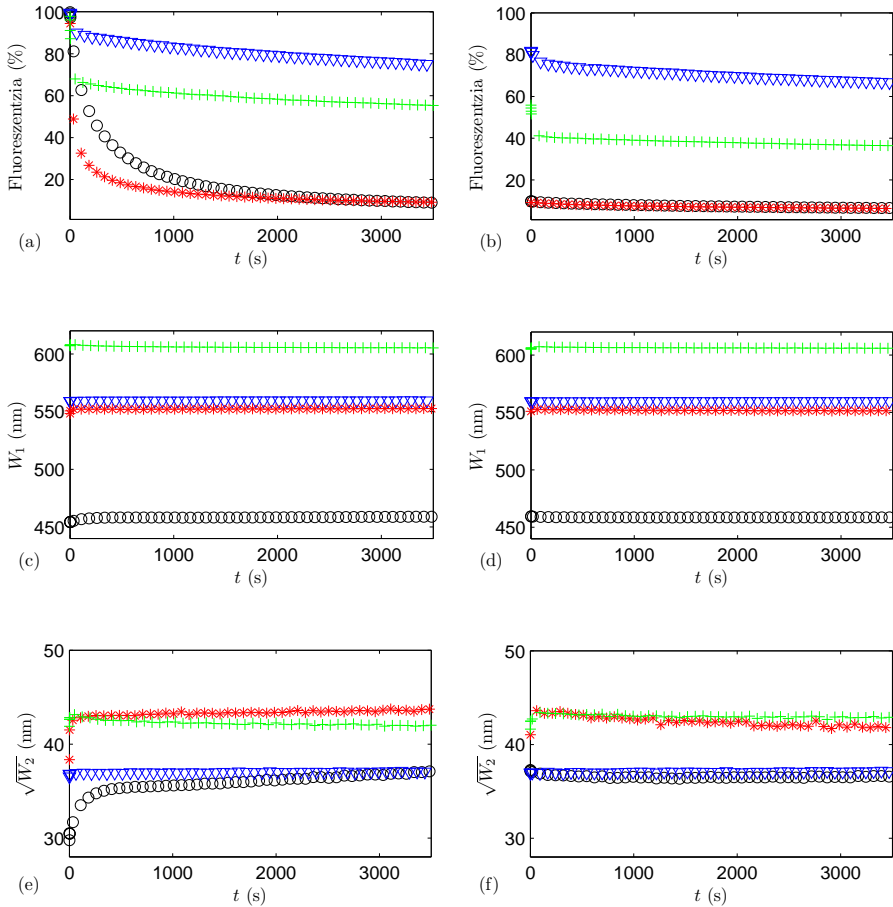


5.10 irudia: (a) F8BT laginaren esposizio desberdinetarako igorpen espektroak, zuntza bere xurgapen maximoko uhin-luzeran kitzikatuz 0.97 Wcm^{-2} irradiantziarekin. Zuntzaren luzera 16 cm izan da. (b) Igorpen espektroen desberdintasunak 24 orduko atsedendaldien aurretik eta ondoren.

5.11(a) ikus daitekeen moduan, F8BT eta PF3T laginak dira egonkorrenak. 80 MHz-tan 60 minututan kitzikatu ostean, alegia, $2.88 \cdot 10^{11}$ laser-pultsuren baliokidea, dopaturiko zuntz bikote honen fluoreszentzia-kapazitateak %25 eta %45 gutxitzen dira, hurrenez hurren. [18] erreferentziako erdibizitzaren definizioa erabiliz gero, hau da, fluoreszentzia intentsitatea erdira jaisteko pasa behar den denbora tartea kontsideratuz gero, bi zuntz hauek ez dira euren erdibizitza baliara heldu oraindik. Dopaturiko beste bi zuntzen kasuan, hots, F8T2 eta PFO, euren fluoreszentzia kapazitateek askoz gehiago sufritzen dute, hasierako intentsitatearen %9a soilik mantentzen baitute denbora tarte beraren ostean. Ikus daitekeen moduan, euren erdibizitzak 30 s ($2.4 \cdot 10^9$ pultsu) eta 200 s-koak ($1.6 \cdot 10^{10}$ pultsu) baino ez dira, hurrenez hurren. PFO laginaren kasuan, igorpen-kapazitatearen galeraren parte batek, ultramorean kokatutako kitzikapen uhin-luzeran izan dezake jatorria, energia altuko fotoiek fotoegonkortasuna gutxitzen lagun baitezakete.

5.11(a) irudiko igorpen-fluoreszentziaren erorketak aztertuz gero, hauek hurrengo espresioarekin ondo doitu daitezkeela ikus daiteke:

$$f(t) = a \exp(-t/\tau_1) + b \exp(-t/\tau_2) \quad (5.4)$$



5.11 irudia: Fluoreszentzia: (a) eta (b), lehenengo momentua: (c) eta (d), eta bigarren momentuaren erro karratua: (e) eta (f), kitzikapen denboraren menpe. Kasu bakoitzean kitzikapen uhin-luzera xurgapen maximoan kokatu da, kitzikapen irradianzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta zuntzaren luzera 16 cm. 60 minututan zehar zuntzak kitzikaturik: (a), (c) eta (e). Atsedendialdiaren ostean zuntzak birkitzikaturik: (b), (d) eta (f). PFO (o); F8BT (∇); F8T2 (*); PF3T (+).

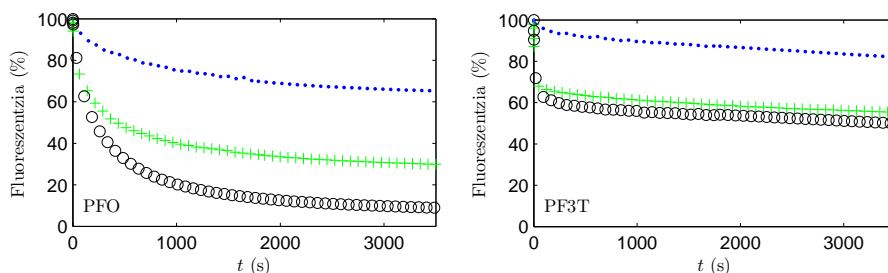
non a , b , τ_1 eta τ_2 konstanteak diren. Bi esponentzialez ordezkatu daitekeen erorketa mota hau hurrengo artikuluan bietan ere ikusi daiteke [19],[20]. Doiketatik lortutako konstante hauen balioak eta dagozkien mugatze-koefizienteak 5.III Taulan zerrendatu ditugu. (5.4) ekuazioan, lehenengo esponentzialak kitzikatze-periodoaren hasierako uneetan igorpen fluoreszentiaren bat-bateko beharakada adierazten du. Bigarren esponentzialak, ordea, epe luzeko beharakada adierazten du. Hau horrela izanik, τ_2 -ren balio altuagoak egoera egonkorreko beharakadaren maldatxikiagoa adierazten du, hau da, fotoegonkortasun hobea. 5.III Taulan erakutsitako F8BT eta PF3T laginen τ_2 balioek, beste bi laginekin konparatuz gero, egonkorragoak direla baieztatzen dute.

5 III TAULA: 5.11(A) IRUDIKO DATU ESPERIMENTALEN ETA (5.4) EKUAZIOAREN ARTEKO DOIKETATIK LORTURIKO BALIOAK.

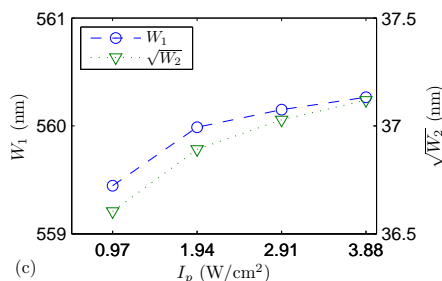
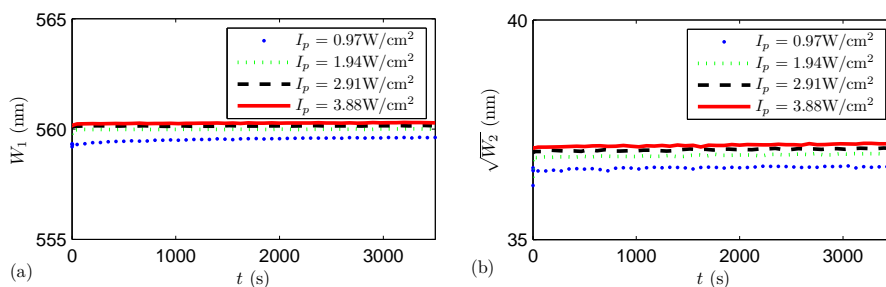
	a	τ_1 (s)	b	τ_2 (s)	R^2
PFO	66,6	187,8	31,4	2366	0,996
F8BT	12,0	48,7	87,7	20934	0,993
F8T2	76,1	42,1	21,8	3147	0,990
PF3T	22,3	8,2	76,9	24450	0,993

Kitzikatze-denborarekiko aldaketa espektralak kontuan hartuz gero, 5.11(c) eta 5.11(e) irudiek aldaketarik handienak PFO eta F8T2 laginei dago kiela adierazten dute. Zehatzagoak izateko, kasu bietan lehenengo momentuaren 4 nm-ko gorriranzko desplazamendua gertatzen da lehenengo 400 s-tan. Denbora honetatik aurrera ez da aldaketa espektral nabaririk ageri. Aldaketa espektral hauek Errodamina eta Pirromezeno molekulekin dopaturiko PZOetan ere behatu dira, dopantearen distribuzio ez-homogeneoarekin erlazionatuz [21]. F8BT eta PF3T laginen kasuan, ez da igorpen-kapazitatearen eboluzioan aldaketa espektral nabaririk ageri.

24 orduko ilunpeko atsedenaldiaren ondoren, fluoreszentzia-kapazitatearen errekupeazioa F8BT laginean bakarrik gertatzen da [ikus 5.10(b) irudia]. 5.10(a) eta 5.10(b) irudiak erkatuz gero, F8BT lagina bere igorpen intentsitatea partzialki errekupeatzeko gai den zuntz bakarra dela ikus dezakegu, atsedenaldiaren osteko igorpen intentsitatea atsedenaldiaren aurrekoa baino %7 altuagoa izanik. Errekupeazio hau, ingelesez *photoblinking* bezala ezagutzen den mekanismoaren ondorioa izan daiteke [20],[21]. Prozesu honetan, dopante molekulek iluntasun-egoera baterako behin-behineko trantsizioa pairatzen dute, molekula gutxi batzuk igorpen-gaitasuna berreskuratzeko gai direlarik. F8BT laginaren errekupeazio gaitasuna hobetu daitekeen konprobatzeko, lagina beste 42 orduko ilunpeko atsedendian mantendu da. Honen ostean, lagina berriro kitzikatu da puntu berean eta %6ko errekupeazioa dagoela ikusi da. Beraz, F8BT-z dopaturiko zuntza 24 ordutan errekupeatu dezakeen maximoa errekupeatzeko gai da. 24 orduko atsedenaldiaren ondorengo aldaketa espektralak kontuan harturik, lehenengo kitzikatze periodoaren bukaerako balioekin konparatuz gero, igorpeneko banden W_1 -a eta $W_2^{1/2}$ -a ia ez dutela aldaketarik jasotzen ikus daiteke [ikus 5.11(d) eta 5.11(f)].



5.12 irudia: PFO eta PF3T laginen fluoreszentzia kapazitatearen eboluzioa kitzikapen denboraren funtzio. Irradiantzia 0.97 Wcm^{-2} izan da eta zuntzaren luzera 16 cm. Hiru uhin-luzera desberdinak: o: 380nm, +: 390nm eta ·: 415nm PFO laginean eta o: 420nm, +: 440nm eta ·: 480nm PF3T laginean.



5.13 irudia: F8BT laginaren lehenengo momentuaren (a) eta bigarren momentuaren erro karratuaren (b) eboluzioak kitzikatzte-denborarekiko, xurgapen maximoko uhin-luzeran eta lau irradiantzia desberdinekin kitzikatuz. Zuntzaren luzera: 16 cm. (c) Kitzikapen irradiantziarekiko momentu bien menpekotasuna 500. segundoan.

Kitzikatzte uhin-luzerak fotoegonkortasunean duen eragina kontuan hartzeko, PFO eta PF3T laginak aztertu ditugu, bakoitza hiru uhin-luzera desberdinetan kitzikatu dugularik. 5.12 irudiak, kitzikatzte uhin-luzera baxua goa den heinean, fluoreszentzia kapazitatea gutxiagotzen dela erakusten du. Efektu hau xurgapeneko eta igorpeneko fotioen energien arteko diferentzia handiagoaren ondorio izan daiteke, hau da, energia diferentzia handiagoa denez, energia honen parte handiago bat matrizerara bero moduan askatzen da, tenperaturaren bidezko degradazioa sustatuz [19]. Honez gain, ultramoretik

hurbil kokatzen diren energia altuko kitzikatze fotoiek ere, fotegonkortasunean partzialki eragin dezakete.

Azkenik, F8BT laginaren fotoegonkortasuna laser irradiantziaren menpe espektralki aztertu dugu. Lorturiko emaitzak 5.13 irudian marraztu ditugu. Ikus daitekeen bezala, irradiantzia handitzen den heinean, lehenengo momentua uhin-luzera luzeagoetarantz (gorrirantz) apur bat desplazatzen da, eta zabalera espektralaren pixka bat zabaltzen da. Zabalera espektralaren portaera honek erabilitako irradiantzia berezko igorpen amplifikatua igortzeko nahikoa izan ez dela adierazten du [22]. Kasu horretara helduta, urdineranzko desplazamendua eta zabalera espektralaren estutzea espero beharko baikenuen.

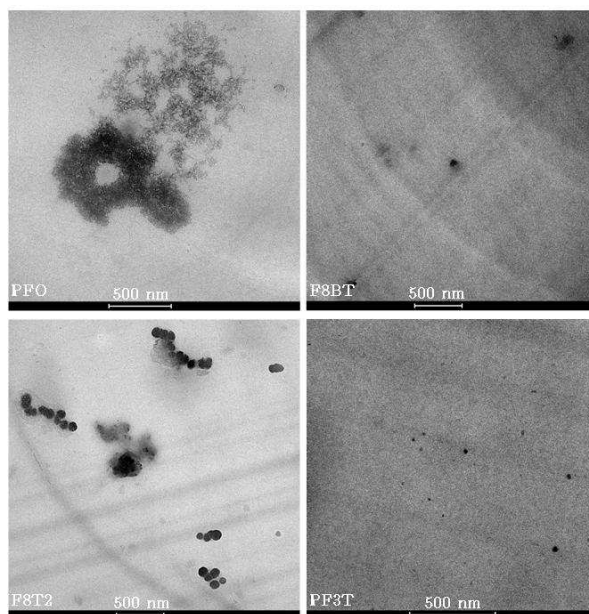
4. Kapituluaren aurkezturiko simulazioen antzekoak egin ditugu. Hauek F8BT polimeroarekin dopaturiko zuntz batean (neurketa esperimentalak egiteko erabilitako zuntzaren parametro berdinak sarrera-datuak bezala erabilia) ASE igorpena lortzeko aplikatu beharreko irradiantzia zein den jakiteko balio dute. Emaitza hauetatik hurrengo ondorioztatu genezake: esperimentalki erabilitako fentosegundoetako laser-pultsuak erabiliz gero, atari irradiantzia (ASE lortzeko aplikatu beharreko irradiantzia minimoa) 1.22 MWcm^{-2} (0.12 mJ/pultsu) izango litzatekeela. Kalkulaturiko atari-balio teoriko hau, dopaturiko PZO antzekoei buruz literaturan aurki daitezkeen atari-balio esperimentalen ordena berekoa da [11],[23].

5.2.4 Dopanteen Distribuzioa PMMA Matrizean

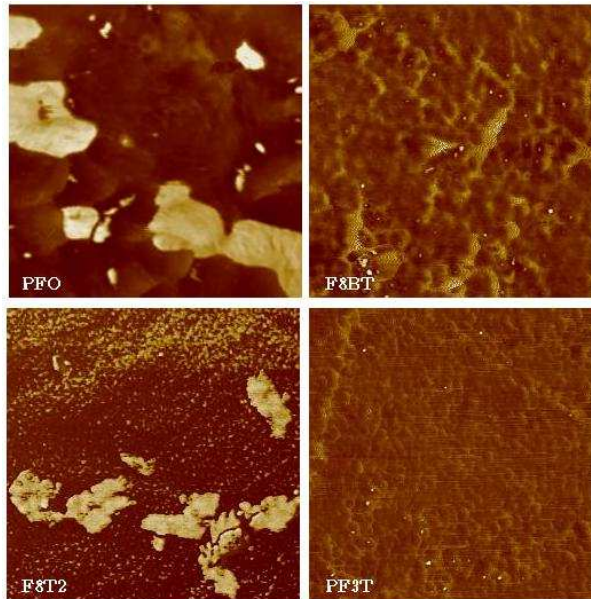
PZOetan, PMMA matrizean dopante molekulen distribuzioak ezaugarri espektroskopikoetan eta fotoegonkortasunean nolako eragina duen determinatzeko, dopaturiko lau zuntzen irudiak atera ditugu, bai AFM teknika eta baita TEM teknika erabilia ere. 5.14 irudian TEM irudiak ikus daitezke, non polimero konjokatuak beltz kolorez agertzen diren eta PMMA matrizea gris kolorean. Ikus daitekeen moduan, PFO eta F8T2 molekulek elkarri lotzeko joera daukate, tamaina handiagoko agregatuak (dispertsio homogeenogutxiago) sortuz. Hala ere, F8BT eta PF3T molekulak, gehienbat, inguruko dopante molekulez inguraturik egon beharrean, PMMA matrizeaz inguraturik daude. 5.15 irudiak dopaturiko zuntz berberen AFM irudi baliokideak erakusten ditu. Irudian agertzen diren kolore aldaketek mota desberdinetako osagaiak daudela adierazten dute, eta, ondorioz, fase banaketa dagoela. Kolore argiz marrazturiko zonaldeak dopante bakoitzarekin erlazioz dauden bitartean, marroi koloreko zonaldeak PMMA matrizea adierazten dute. 5.15 irudiak ikerturiko zuntzetan PFO eta F8T2 molekulek agregatuak sortzen dituztela baieztatzen du. Irudi bietan agregatuen tamaina desberdinak neur daitezke. PFO molekulez dopaturiko zuntzen kasuan, agregatuak $1 \mu\text{m}$ -ko tamaina iza-

tera heltzen dira. F8T2ren kasuan, dopante multzoak txikiagoak dira, 500 nm-ko diamentroraino heltzen direlarik. Irudi hauek, kapituluan zehar erakutsitako ezaugarri espektroskopikoekin ondo egiten dute bat. PFO eta F8T2 molekulen distribuzio ez-uniformea PMMA matrizean, alde batetik, igorpenean neurtutako aldaketa espektral nabarien sortzailea, eta, beste alde batetik, fotoegonkortasun ezaugarrien erantzulea izan daiteke.

Fotoegonkortasunaren eta PMMA matrizean dagoen dopante-distribuzioaren arteko erlazioa azaldu egin daiteke, matrize solidoaren zurruntasunagatik eta dopante-matrize arteko interakzio indarrarengatik. Bi ezaugarriek temperaturak kitzikaturiko erreakzio probabilitateak gutxitzen dituzte, dopante molekulekin dopaturiko polimeroen degradazio iturririk ohikoena dena [24]. Honez gain, jakina da PMMA matrizearekin zuzenean inguraturiko molekulak ezpurutasun errektiboetatik babesturik daudela [25],[18]. Hau horrela izanik, PMMA matrizearekin inguraturiko F8BT eta PF3T molekulak degradazio efektuetatik partzialki babesturik daude, eta, ondorioz, molekula hauekin dopaturiko zuntzak euren igorpen kapazitatea luzaroago mantentzeko gai dira. PFO eta F8T2 molekulekin dopaturiko zuntzetan, ordea, hainbat dopante molekula ez daude PMMA matrizearekin inguraturik, eta, ondorioz, egonkortasuna baxuagoa da.



5.14 irudia: Lau dopaturiko PZOen TEM irudiak. Polimero konjokatuak: beltz kolorea. PMMA: gris-argi kolorea.



5.15 irudia: Lau dopaturiko PZOen AFM irudiak. Irudi guztien azalera $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ da. Polimero konjokatuak: kolore argian. PMMA: marroi kolorea.

5.3 Ondorioak

Fentosegundotako laser baten bitartez, lau polimero konjokatu desberdinekin dopaturiko PZOen ezaugarri optikoak karakterizatu ditugu. Dopantearen distribuzioak matrizean, bai igorritako espektroen ezaugarrietan, eta baita fotoegonkortasunean ere, ondorioak dituela demostratu dugu. Agregatuak eratzeko joera duten molekulek, igorpen-espektroen ezaugarrietan aldaketa nabariagoak izaten dituzte kitzikapen uhin-luzera aldatzean. Honez gain, laser-pultsuekin denbora tarte nahiko luze batean kitzikatu ostean, euren fluoreszentzia igortzeko kapazitatea ere modu nabariagoa batean gutxitzen da. Kitzikatze uhin-luzerak ere badu eragina fotoegonkortasunean tenperaturaren ondoriozko degradazioaren ondorioz. Aztertutako laginen artean, F8BT molekulekin dopaturiko zuntza izan da egonkorrena. Igorpen-espektroen aldaketak dopaturiko zuntzetan zeharreko argi-propagazioaren menpe ere neurtu ditugu. Propagazio-distantzia luzeagoa den heinean, igorpen-espektroa gehiago desplazatzen da uhin-luzera luzeagoetara (gorriranzko desplazamendua). Gorriranzko desplazamendu honen maldak erlazioa zuzena du xurgapen eta igorpen espektroen gainjarpenarekin. Kapitulu honetan zehar aztertutako emaitzak kualitatiboki erabat baliozkoak dira beste PMMA PZOzko laginak erabili arren, ezaugarri optikoak, nagusiki, dopante motak berak determinatzen baititu. Beraz, kapitu-

luan zehar eginiko ikerketa-lana polimero konjokatuekin dopaturiko PZOzko laserrak eta anplifikagailuak diseinatzeko oso lagungarria izan daiteke.

5.4 Erreferentziak

- [1] J. Zubia eta J. Arrue. "Plastic optical fibres: An introduction to their technological processes and applications," *Optical Fibre Technology: Materials, Devices and Systems.*, vol. 7, no. 2, pp. 101-40. 2001.
- [2] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. "Theoretical and experimental investigation of rhodamine B-doped polymer optical fibre amplifiers," *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 2215-20. 1995.
- [3] T. Kobayashi, K. Kuriki, N. Imai, T. Tamura, K. Sasaki, Y. Koike eta Y. Okamoto. "High-power polymer optical fibre lasers and amplifiers," Presented at Proceedings of the SPIE - the International Society for Optical Engineering. 1999.
- [4] A. Charas, A. L. Mendonça, J. Clark, G. Lanzani, L. Bazzana, A. Nocivelli eta J. Morgado. "Plastic optical fibres with gain and switching," Presented at Proc Conf. on Telecommunications - ConfTele. 2009.
- [5] A. Charas, A. L. Mendonça, J. Clark, J. Cabanillas-Gonzalez, L. Bazzana, A. Nocivelli, G. Lanzani eta J. Morgado. "Gain and ultrafast optical switching in PMMA optical fibres and films doped with luminescent conjugated polymers and oligomers," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, no. 1, pp. 45-53. 2010.
- [6] R. Palacios, P. Formentin, E. Martinez-Ferrero, J. Pallarès eta L. Marsal. "-Phase morphology in ordered poly (9, 9-dioctylfluorene) nanopillars by template wetting method," *Nanoscale Research Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1-5. 2010.
- [7] J. Jo, D. Vak, Y. Y. Noh, S. S. Kim, B. Lim eta D. Y. Kim. "Effect of photo-and thermo-oxidative degradation on the performance of hybrid photovoltaic cells with a fluorene-based copolymer and nanocrystalline TiO₂," *J.Mater.Chem*, vol. 18, no. 6, pp. 654-659. 2008.
- [8] A. Charas, J. Morgado, J. Martinho, L. Alcácer eta F. Cacialli. "Tuning the optoelectronic properties of polyfluorenes by copolymerisation with thiophene moieties," *Synth. Met*, vol. 127, no. 1-3, pp. 251-254. 2002.

- [9] R. Kruhlak eta M. Kuzyk. "Side-illumination fluorescence spectroscopy. I. principles," *JOSA B*, vol. 16, no. 10, pp. 1749-1755. 1999.
- [10] R. Kruhlak eta M. Kuzyk. "Side-illumination fluorescence spectroscopy. II. Applications to squaraine-dye-doped polymer optical fibres," *JOSA B*, vol. 16, no.10, pp. 1756-1767. 1999.
- [11] M. Rajesh, M. Sheeba, K. Geetha, C. P. G. Vallaban, P. Radhakrishnan eta V. P. N. Nampoorei. "Fabrication and characterization of dye-doped polymer optical fibre as a light amplifier," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 1, pp. 106-112. 2007.
- [12] C. Pulido. "Multiple fluorescence sensing with side-pumped tapered polymer fibre," *Sensors Actuators B: Chem.*, vol. 157, pp. 560. 2011.
- [13] L. Bazzana, G. Lanzani, R. Xia, J. Morgado, S. Schrader eta D. G. Lidzey, "Plastic optical fibres with embedded organic semiconductors for signal amplification," in *Proceedings of the 16th International Plastic Optical Fibres Conference*, Torino, Italy, 2001, pp. 327.
- [14] M. G. Kuzyk, *Polymer Fibre Optics. Materials, Physics, and Applications*. Taylor & Francis Group, 2007.
- [15] B.P. Lyons, "Energy transfer to dopant molecules in polyfluorene films," Ph.D. dissertation, Dept. of Physics, Univ. of Durham, Durham, UK, 2005.
- [16] J. Arrue, F. Jimenez, M. A. Illarramendi, J. Zubia, I. Ayesta, I. Bikandi eta A. Berganza. "Computational analysis of the power spectral shifts and widths along dye-doped polymer optical fibres," *IEE Photonics Journal*, vol. 2, pp. 521. 2010. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5464344.
- [17] M. A. Illarramendi, J. Zubia, L. Bazzana, G. Durana, G. Aldabaldetrekua eta J. R. Sarasua. "Spectroscopic characterization of plastic optical fibres doped with fluorene oligomers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 15, pp. 3220-6. 2009. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2008.2010274>.
- [18] M. Faloss, M. Canva, P. Georges, A. Brun, F. Chaput eta J. P. Boilot. "Toward millions of laser pulses with pyrromethene-and perylene-doped xerogels," *Appl. Opt.*, vol. 36, no.27, pp. 6760-6763. 1997.
- [19] A. Costela, F. Florido, I. Garcia-Moreno, R. Duchowicz, F. Amat Guerri, J. Figuera eta R. Sastre. "Solid-state dye lasers based on copoly-

- mers of 2-hydroxyethyl methacrylate and methyl methacrylate doped with rhodamine 6G,” *Appl. Phys. B*, vol. 60, no. 4, pp. 383-389. 1995.
- [20] I. Rodrigues eta J. Sanches. “Photoblinking/photobleaching differential equation model for intensity decay of fluorescence microscopy images,” Presented at *Biomedical Imaging: from Nano to Macro*, 2010 IEEE International Symposium on. 2010.
- [21] G. D. Peng, Z. Xiong eta P. L. Chu. “Fluorescence decay and recovery in organic dye-doped polymer optical fibres,” *J. Lightwave Technol*, vol. 16, no. 12, pp. 2365-2372. 1998.
- [22] I. D. W. Samuel, E. B. Namdas eta G. A. Turnbull. “How to recognize lasing,” *Nature Photonics*, vol. 3, no. 10, pp. 546-549. 2009.
- [23] T. Kobayashi eta W. Blau. “Laser emission from conjugated polymer in fibre waveguide structure,” *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 2, pp. 67-68. 2002.
- [24] G. D. Peng, P. Chu, Z. Xiong, T. W. Whitbread eta R. P. Chaplin. “Dye-doped step-index polymer optical fibre for broadband optical amplification,” *J. Lightwave Technol*, vol. 14, no. 10, pp. 2215-2223. 1996.
- [25] A. Dubonis, M. Canva, A. Brun, F. Chaput eta J. P. Boilot, “Photostability of dye molecules trapped in solid matrices,” *Appl. Opt.*, vol. 35, pp. 3193, 1996.

6. Kapitulu

Ondorioak

Laburpena— Kapitulu honetan tesi-lan honetan zehar ateratako emaitzarik garrantzitsuenak ondorioztatzen dira. Honez gain, eginiko ikerketa lan guzti honen ondorioz zientzia-aldizkari garrantzitsuetan eta konferentzia biltzarretan publikaturiko artikulua ere zerrendatuko dira. Azkenik, tesi hau bukatu ostean etorkizunean jarrai daitezkeen ikerketa-lerroen azalpen labur bat emango dugu.

6.1 Tesi-lan Honen Ekarpinak

6.1.1 Garaturiko Sistema-eredua

Bi energia-maila (oinarrizko egoera eta kitzikaturiko singlete-egoera) dituen sisteman oinarrizko laserraren tasa-ekuazioak garatu ditugu, xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen bitartez analisi espektralak egiteko gai garelarik. Ekuazio hauek ebazteko, ad hoc eredu konputazionala garatu dugu, hiru aldagai independente kontuan harturik: denbora, argiak bidaiaturiko distantzia eta uhin-luzera, hain zuzen ere. Modu honetan, PZO aktiboetan zehar sorturiko potentzia, uhin-luzera eta erantzuna momentu bakoitzerako kalkulatu ahal izan ditugu.

Indize gradualeko zuntzen kasuan, zenbakizko irekidura ez-uniformearen efektua kalkulatu egin da, ekuazioetan igorpen estimulatuan eragina duten espontaneoki sortutako fotoi-frakzioaren batez besteko balioa sartuz. Honez gain, gure ereduak indize gradualeko PZOen dopante-dentsitate eta potentzia-dentsitate ez-uniformeen arteko gainjarpenaren eragina ere kontuan hartzen du.

6.1.2 PZOzko Laser eta Anplifikagailuen Ikerketa Teorikotik Ateratako Ondorioak

PZOzko laser eta anplifikagailuen igorpen-ezaugarrien ikerketatik, hurrengo emaitzak ondorioztatzea lortu dugu:

- Lehenik eta behin, xurgapeneko eta igorpeneko gurutze-sekzioen gain-jarpenaren eragina erakutsi dugu, maila-indizeko PZOen igorpen espektroen desplazamenduan eta zabalera espektralean. Honi dagokionez, Errodamina B edo Errodamina 6G bezalako gainjarpen handia duten dopanteek, dopaturiko zuntzen luzera egokiro aldatuz laser-igorpenaren espektroa sintonizatzeko aukera handiak erakusten dituzte.
- Zenbakizko irekiduraren gehitzeak eragin onuragarriak dituela ere erakutsi dugu maila-indize eta indize gradualeko PZOetan oinarrituriko laserren ASE atari-potentzian eta malda-efizientzian. Parametro hau aldatzeak dakartzan eragin onuragarriak azaltzeaz gain, kuantifikatu ere egin ditugu.
- PZOzko anplifikagailuen kasuan, γ parametroaren gehikuntzak seinale-irabazian hobekuntzak sortzen dituela ikusi dugu. Honez gain, maila-indizeko eta indize gradualeko PZOen kasuak konparatu ditugu, aplikazioaren araberrako abantailak eta desabantailak eskainiz. Honen harira, zuntz mota bietan seinale-uhin-luzera eta ponpaketa-potentzia optimoak hainbat parametroren menpe aztertu ditugu, hala nola, zuntzaren luzera, zuntzaren zenbakizko irekidura, dopantearen distribuzio erradiala, etab. Maila-indize edo indize gradualeko PZOzko anplifikagailuetan zenbakizko irekidurak seinale-irabazian eragin positiborik ez duela erakutsi dugu. Izan ere, ASE igorpenak ez du inola ere seinale-irabazian laguntzen.

6.1.3 PZO Dopatuen Karakterizazio Esperimentaletatik Ateratako Ondorioak

Matrizeko dopantearen distribuzioak igorpeneko ezaugarri espektraletan eta fotoegonkortasunean eragina duela demostratu dugu. Alde batetik, polimerozko zuntzetan agregatuak sortzeko joera duten dopanteek, kitzikapen uhin-luzera aldatzean, igorpeneko ezaugarri espektraletan aldaketa gehiago pairatzen dituzte. Bestetik, fluoreszentzia igortzeko kapazitatea asko gutxiago-

tzen da denbora-tarte luzean zehar laser-pultsuekin kitzikatzen direnean.

6.2 Emaitzen Plazaratzea

Arestian aipaturiko emaitzak zientzia-aldizkari garrantzitsuetan eta konferentzia biltzarretan artikulua bezala publikatzea lortu da. Atal honetan kontribuzio hauek zerrendatuko ditugu, kategoria desberdinetan banatuz eta era kronologikoan aurkeztuz.

6.2.1 Nazioarteko Aldizkarietan Publikatua

Nazioarteko lau aldizkari desberdinetan bost artikulua publikatzea lortu da:

- *Computational analysis of the power spectral shifts and widths along dye-doped polymer optical fibers.*
Aldizkaria: IEEE Photonics Journal.
Urtea: 2010.
- *Computational analysis of the amplification features of active plastic optical fibers.*
Aldizkaria: Physica Status Solidi A. Applications and Materials Science.
Urtea: 2011.
- *Analysis of the emission features in graded-index polymer optical fiber amplifiers.*
Aldizkaria: Journal of Lightwave Technology.
Urtea: 2011.
- *Polymer-optical-fiber lasers and amplifiers doped with organic dyes.*
Aldizkaria: Polymers.
Urtea: 2011.
- *Luminescence study of polymer optical fibers doped with conjugated polymers.*
Aldizkaria: Journal of Lightwave Technology.
Urtea: 2012.

6.2.2 Nazioarteko Kongresu-txostenetan Publikatuak

Hainbat nazioarteko kongresuen txostenetan sei artikulu publikatu ditugu:

- *Computational analysis of the amplification features of active plastic optical fibers.*

Konferentzia: 4th International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOPMA2010, Budapest, Hungaria).

Urtea: 2010.

- *Computational techniques to simulate the behavior of active POFs.*

Konferentzia: 19th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2010, Yokohama, Japonia).

Urtea: 2010.

- *Amplification of light in dye doped polymer optical fibers.*

Konferentzia: Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC2011, LA, EEBC).

Urtea: 2011.

- *Emission features in step-index and graded-index POF lasers and amplifiers doped with organic dyes.*

Konferentzia: 20th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2011, Bilbo, Espainia).

Urtea: 2011.

- *Optical spectroscopy of plastic optical fibres doped with luminescent conjugated polymers.*

Konferentzia: 21st International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2012, Atlanta, EEBC).

Urtea: 2012.

- *Influence of the pump characteristics on graded-index and step-index dye doped POF lasers.*

Konferentzia: 21st International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2012, Atlanta, EEBC).

Urtea: 2012.

6.2.3 Estatuko Kongresu-txostenetan Publikatuak

Estatu mailako kongresu bitan, beste hainbeste artikulu publikatu ditugu:

- *Generación y amplificación de luz en fibras ópticas de polímero dopadas.*

Konferentzia: XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio (URSI2011, Bilbo, Espainia).

Urtea: 2011.

- *Amplificación de señales en fibras ópticas de polímero dopadas.*

Konferentzia: 7^a Reunión Nacional de Optoelectrónica (OPTOEL'11, Santander, Espainia).

Urtea: 2011.

6.2.4 Erlazionaturiko Publikazioak

Tesi-lan honekin zerikusia duten publikazioetatik haratago, polimerozko zuntz optikoekin erlazionaturiko beste lan batzuk ere publikatu ditugu:

- *Critical angle in fluorescent polymer optical fibers.*

Aldizkaria: Proc. SPIE 8258.

Urtea: 2012.

- *Maximum acceptance angle in dye doped polymer optical fibers.*

Konferentzia: 20th International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2011, Bilbao, Espainia).

Urtea: 2011.

- *Spectral analysis of scattered light in plastic optical fibers by sideillumination technique.*

Konferentzia: 21st International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2012, Atlanta, EEBB).

Urtea: 2012.

- *Emisión en fibras de plástico dopadas utilizando la técnica de excitación transversal.*

Konferentzia: 7^a Reunión Nacional de Optoelectrónica (OPTOEL'11, Santander, Espainia).

Urtea: 2011.

6.2.5 Prozesuan dauden Artikuluak

Tesi hau depositatzen denerako beste hiru lan publikatzeko prozesuan egongo gara:

- *Amplified spontaneous emission in graded-index polymer optical fibers: theory and experiment.*
Aldizkaria: Optics Express.
Bidali den data: 2013ko uztaila.
- *One photon and two photon spectroscopy in polymer optical fibres doped with conjugated polymer.*
Konferentzia: 22nd International Conference on Plastic Optical Fibres (ICPOF2013, Rio de Janeiro, Brasil).
Bidali den data: 2013ko uztaila.
- *Espectroscopia a un fotón y dos fotones en fibras ópticas de polímero dopadas con polímeros conjugados.*
Konferentzia: VIII Reunión Nacional de Optoelectrónica (OPTOEL'13, Alcalá de Henares, Espainia).
Bidali den data: 2013ko ekaina.

6.3 Etorkizuneko Ikerketa-lana

PZOzko laser eta anplifikagailuen igorpen-ezaugarrien buruzko hainbat aspektu ikertu ditugun arren, oraindik ere gauza asko daude egiteko. Etorkizunean ikerketa-lanek jarrai dezaketen norabidea hurrengoa izan daiteke:

- Tesi-lan honetan atzeraka hedatzen den argiaren hedaketarik ez dugu kontutan hartu. Hala ere, analisi-aukera gehiago eskaintzen dituen eredu osoagoa garatu genezake, adibidez, atzeraka hedatzen den argiaren eragina zein den aztertzeke. Aldaketa hau gure sistema-ereduan modu erraz batean aplikatu daiteke, [1]-[3] erreferentzietan ikus daitezkeen antzeko moduan.
- Ponpaketa-dentsitate altuekin gerta daitezkeen xurgapeneko efektu ez-linealak kontuan hartzea ere interesgarria izango litzateke. Nahiz eta prozesu hauek xurgapen lineala baino hainbat magnitude-ordena ahulagoak izan [4],[5], dopante organikoak eta potentzia dentsitate altuak erabiltzen direnean, anplifikazioaren azterketa sakona egiteko oso interesgarria izan daiteke. Zorionez, PZO aktiboak simulatzeko garatu dugun sistema-ereduak efektu ez-lineal hauek kontuan hartzeko malguta-

sun nahikoa du. Edonola ere, algoritmo numeriko eta tasa-ekuazio konplexuagoak garatu beharko genituzke.

- Dopante organiko eta polimero konjokatuekin dopaturiko PZOzko laser eta amplifikagailuen ezaugarri optikoen karakterizazio espektroskopiko sakonagoa egitea ere oso interesgarria izango litzateke. Teknika espektroskopiko desberdinak erabil daitezke horretarako, adibidez, ingelesez *pump-probe* edo *pump-push-probe* bezala ezagutzen direnak [6]. Teknika hauen bitartez, igorpen-espektroak, denborazko dinamikak, irabazi optikoa, laser-efizientzia, ataria, etab. bezalako balioak neurtu ahal izango ditugu. Honez gain, ikerketa-taldean erosi berri dugun Streak kameraren bitartez, igorpen ezaugarriak tenporalki eta espektralki aztertu ahal izango ditugu, pikosegundoetako denborareresoluzioarekin. Azkenik, laborategiko laser desberdinen laguntzaz PZO aktiboak fotoi-bat edo fotoi-biko kitzikapen teknikak erabilia kitzikatu ahal izango ditugu.

6.4 Erreferentziak

- [1] M.A. Rebolledo eta S. Jarabo. "Erbium-doped silica fiber modelling with overlapping factors," *Applied Optics*, vol. 33, no. 24, pp. 5585-5593. 1994.
- [2] E. Desurvire, M. Zirngibl, H.M. Presby eta D. DiGiovanni. "Characterization and modelling of amplified spontaneous emission in unsaturated erbium-doped fiber amplifiers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 127-129. 1991.
- [3] S. Jarabo eta M.A. Rebolledo. "Analytic modelling of erbium-doped fiber amplifiers on the basis of the intensity-dependent overlapping factors," *Applied Optics*, vol. 34, no. 27, pp. 6158-6163. 1995.
- [4] Y.P. Meshalkin, V.A. Svetlichnyi, A.V. Reznichenko, A.Y. Myachin, S.S. Bakhareva, S.M. Dolotov, T.N. Kopylova eta E.P. Ponomarenko. "Two-photon excitation of dyes in a polymer matrix by femtosecond pulses from a Ti:sapphire laser," *Quantum Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 803-806. 2003.
- [5] M. Sheeba, M. Rajesh, S. Mathew, V.P.N. Nampoori, C.P.G. Vallabhan eta P. Radhakrishnan. "Side illumination fluorescence emission characteristics from a dye doped polymer optical fiber under two-photon excitation," *Applied Optics*, vol. 47, no. 11, pp. 890-898. 2008.
- [6] A. Charas, A. L. Mendonça, J. Clark, J. Cabanillas-Gonzalez, L. Bazzana, A. Nocivelli, G. Lanzani eta J. Morgado. "Gain and ultrafast optical switching in PMMA optical fibers and films doped with luminescent conjugated polymers and oligomers," *Front. Optoelectron.*, vol. 3, no. 1, pp. 45-53. 2010.

A Eranskina

Techniques for Measuring the Attenuation Coefficient

In this appendix we show different techniques that are usually employed to measure the attenuation coefficient of optical fibres.

A.1 Optical Time-Domain Reflectometer

The optical time-domain reflectometer, or OTDR, is a general-purpose device used to characterize losses in optical fibres [1].

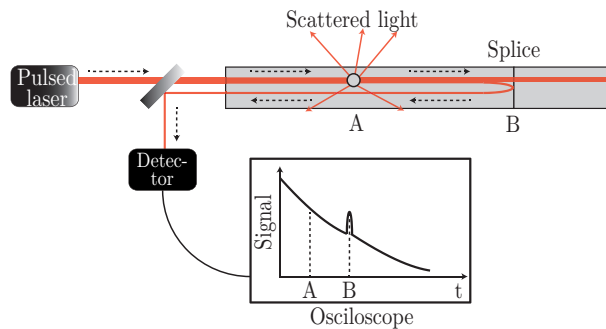


Fig. A.1: The optical time domain reflectometer (OTDR) uses the time dependence of reflected light to analyze fibre losses.

As can be observed in Fig. A.1, an OTDR operates by coupling a short pulse of light into the fibre under test. As the pulse propagates in the fibre, a certain power fraction, which is scattered (point A) or reflected (point B) from splices or other irregularities, comes back to the acquisition system and produ-

ces a time-dependent photodetector signal. This is displayed on as a trace that is shows the losses in the fibre link.

A.2 Cutback Technique

The cutback technique serves to calculate the fibre attenuation by measuring the transmitted intensity through different fibre lengths. Repeatedly, a piece of fibre is removed to measure the transmitted intensity. This technique can be used both to determine the loss accurately and to estimate the loss quickly. In the later case, only two measurements have to be carried out (see Fig. A.2). In a first measurement, the incident power P_0 and the transmitted power P_1 are recorded for a fibre of length L , and the following product is obtained:

$$\alpha L = -10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) \quad (\text{A.1})$$

Then a section of fibre ΔL is cut from the output end while the input end remains fixed, and the output end is polished. Next, the incident power P_0 and the transmitted power P_2 are recorded, and the following product is obtained:

$$\alpha(L - \Delta L) = -10 \log \left(\frac{P_2}{P_0} \right) \quad (\text{A.2})$$

If we replace Equation (A.1) in Equation (A.2) and solve for α , we get

$$\begin{aligned} \alpha L - \alpha \Delta L &= -10 \log \left(\frac{P_2}{P_0} \right) \\ -10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right) - \alpha \Delta L &= -10 \log \left(\frac{P_2}{P_0} \right) \\ \alpha &= -\frac{10}{\Delta L} \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

It is noticeable from Equation (A.3) that the incident intensity does not need to be measured. This is an important issue, because it is very difficult to measure it due to the uncertainty about how much light is coupled into the fibre.

Although this method is fast, because it only requires two sets of simple measurements, it can be inaccurate due to the variability in the amount of light that exits the fibre as a consequence of the polishing process. The large uncertainty of the measured loss that is introduced by the polishing process can be reduced if many measurements are averaged from multiple cutback experiments using a sequence of successively shorter fibres. To improve the accuracy, the cutback process is repeated several times by successively cutting small pieces of fibre from the detector end and measuring the transmitted intensity after each slice is removed. Finally, a linear fit to the logarithmic plot of the data yields the loss.

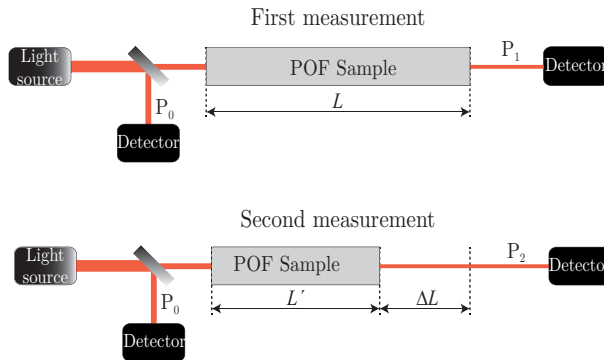


Fig. A.2: The optical loss in a POF sample (top); and the loss in the same fibre when it is cut (bottom).

A.3 Side-Illuminated Fluorescence

On the one hand, the cutback is a good technique for measuring very low attenuation coefficients because long lengths of fibre can be used. On the other hand, the thin film absorption measurement, in which the light passes perpendicular to the plane of the sample, is suitable for measuring high attenuation coefficients. However, the regions of the spectrum where the attenuation makes transitions from high to low are often the most difficult ones to measure, because separate measurements need to be combined. The side-illuminated fluorescence spectroscopy (SIF) fills this gap when the POF is fluorescent [2],[3]. Moreover, the SIF has the advantage of being a non-destructive technique and it can be used to study the properties of molecules that are embedded in POFs.

Fig. A.3 shows the set-up for SIF, where a doped POF sample is excited from the side and the generated fluorescence is guided down the fibre. The spectrum of light that exits the fibre is measured with a spectrometer. The excitation point can be moved along the fibre so that the spectrum can be measured as a function of the propagation distance z , yielding the absolute value of the attenuation.

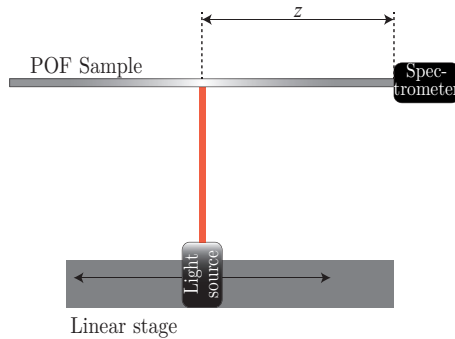


Fig. A.3: Side-illuminated fluorescence set-up. The light is collected with a spectrometer after it has travelled a distance z through the POF sample.

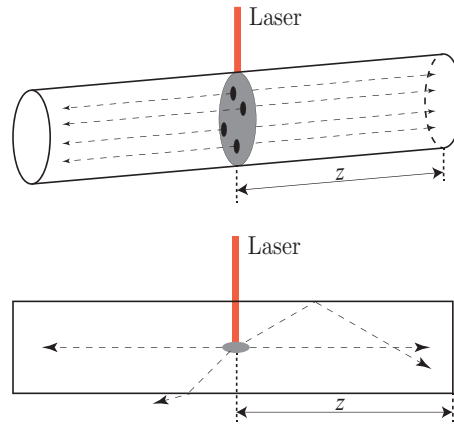


Fig. A.4: Side-illuminated fluorescence light that (top) travels along the fibre axes and (bottom) is a point source.

There are some aspects that should be considered when calculating the propagation distance in a POF sample. Fig.A.4 shows two possible geometries: one when the generated light travels parallel to the fibre axis (top), and the more realistic model in which the light is generated as a point source (bottom). If the diameter of the excitation beam is larger than that of the fibre, the illuminated portion of the POF can be approximated as a homogeneous light source. In this case, the light intensity in the fibre end after propagating a distance z is given by

$$I(\lambda, z) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) \cdot z] \quad (\text{A.4})$$

Although the average distance travelled by light in the point-source case is longer than in the parallel case, the resulting attenuation coefficients that are calculated employing the two cases differ in less than 10% [4].

The SIF is a non-destructive technique that can be used to measure attenuation coefficients, as well as to study the emission properties of dopant molecules embedded in POF samples. This explains why the experimental study of POFs doped with four different conjugated polymers, which is shown in chapter 5, was carried out using this technique.

A.4 References

- [1] R. S. Quimby. "Photonics and lasers. An introduction" Wiley-Interscience, 2006.
- [2] R. Kruhlak eta M. Kuzyk, "Side-illumination fluorescence spectroscopy. I. Principles," JOSA B, vol. 16, no. 10, pp. 1749-1755, 1999.
- [3] R. Kruhlak eta M. Kuzyk, "Side-illumination fluorescence spectroscopy. II. Applications to squaraine-dye-doped polymer optical fibers," JOSA B, vol. 16, no. 10, pp. 1756-1767, 1999.
- [4] M. A. Illarramendi, J. Zubia, L. Bazzana, G. Durana, G. Aldabalde-treku eta J. R. Sarasua, "Spectroscopic characterization of plastic optical fibers doped with fluorine oligomers," Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 15, pp. 3220-3226. 2009.

B Eranskina

Calculation of the Parameters β and γ

β can be calculated from the solid angle corresponding to the maximum inclination of guided light rays with respect to the z axis (see Fig. B.1). For an SI fibre whose core refractive index is n_1 and whose cladding refractive index is n_2 , we can estimate the value of β , which is constant, as the quotient between the solid angles in guided directions and in all directions [1]. In the case of GI fibres, we can first calculate the value of β at the fibre axis (β_0) in the same way, as follows:

$$\beta_0 = \frac{\int_0^{\theta_c} I_0 2\pi \sin \theta d\theta}{\int_0^\pi I_0 2\pi \sin \theta d\theta} = \frac{1 - \cos \theta_c}{2} = \frac{n_1 - n_2}{2n_1} = \frac{NA_0^2}{4n_1^2} \quad (\text{B.1})$$

but, in this case, β is not constant, since the core refractive index decreases from n_1 at the fibre axis to n_2 at the core-cladding interface, so β depends on the radial distance r and an average value of β should be calculated. In Equation (B.1), I_0 is the light intensity (in W/sr) emitted spontaneously by an atom, θ_c is the complementary critical angle and NA_0 is the numerical aperture of the fibre at its symmetry axis.

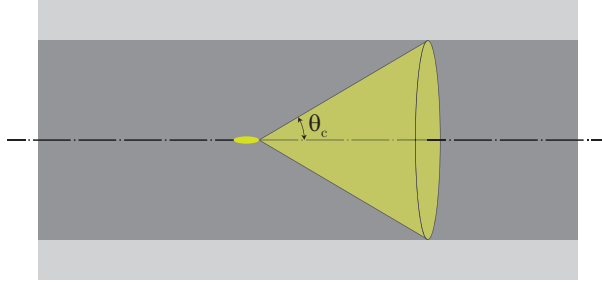


Fig. B.1: Representation of the solid angle of the guided emitted rays in a fibre.

In order to obtain an average value of β we calculate the fraction of guided directions $\beta_r(r)$ as a function of the radial distance r

$$\beta_r(r) \approx \beta_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a_0} \right)^2 \right] \quad (\text{B.2})$$

Notice that it has the same shape as $NA(r)^2$. Now we have to average the previous expression for the range of radii between $r=0$ and $r=a_0$ (core radius). This average should be weighted proportionally both to r (since the differential area is $dA = 2\pi r dr$) and to the not-necessarily-normalized dopant distribution $\theta_{mn}(r)$. Specifically, the average value of β is obtained as follows:

$$\beta = \frac{\int_0^{a_0} \beta_r(r) \theta_{mn}(r) r dr}{\int_0^{a_0} \theta_{mn}(r) r dr} \quad (\text{B.3})$$

We will maintain n_1 constant in all cases (the same core) and we will consider the influence of the refractive index of the cladding. For the typical values $n_1 = 1.492$ and $n_2 = 1.402$, we obtain that β is 0.02, so this has been the average value employed for most of our simulations. Fig. B.2 illustrates the corresponding values of $\beta_r(r)$ and of the distribution $\theta(r)$ of dopant concentration, from which equation (B.3) yields the aforementioned β (dotted line). On the one hand, we can note that $\beta_r(r)$ decreases with r , which implies smaller total spontaneous emission than in the case of SI POFs with the same NA_0 and, therefore, it implies greater signal gains in GI POF amplifiers than in SI ones, as will be shown. On the other hand, $\theta(r)$ is maximum when $r=0$, where the light density in a GI fibre is also maximum, so $\gamma > 1$.

The minimum possible average value β is 0, which would happen if $n_1 = n_2$, although this is only a theoretical limit, since it would imply a flat

refractive-index profile. The maximum one is approximately 0.15, which happens when $n_2 = 1$, *i.e.*, in an uncladded POF.

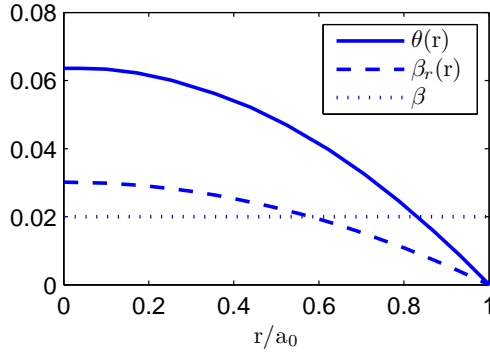


Fig. B.2: β (average value) obtained from equation (B.3) for a typical GI POF, in which $\theta(r)$ and $\beta_r(r)$ decrease with r as shown in the solid and dashed curves.

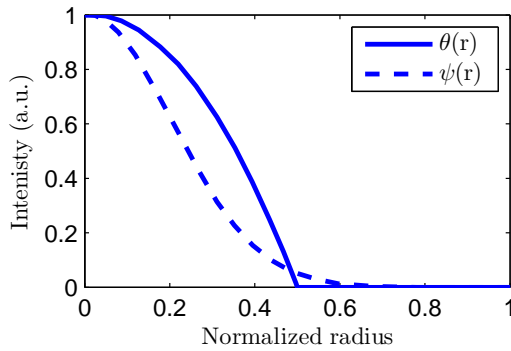


Fig. B.3: Normalized dye density and power density distributions $\theta(r)$ and $\psi(r)$, respectively, obtained from [2].

Regarding the overlapping factor γ , it can be defined as:

$$\gamma = \int_0^{a_0} \theta(r) \psi(r) 2\pi r dr \quad (\text{B.4})$$

where $\theta(r)$ and $\psi(r)$ are the normalized dye density and power density distributions (see Fig. B.3), respectively, and a_0 is the core radius. The physical meaning of $\psi(r)$ and $\theta(r)$ can be interpreted from the following relationships: we can define $I(t, z, r) = P(t, z) \psi(r)$, where $P(t, z)$ (in watts) is the total power in the cross section at a given t and z , and $\psi(r)$ is a factor to obtain the light density I (in W/m^2) at r and those t and z [2]. Similarly, we can define the molecular density per unit volume at each position r as $n(t, z, r) = N(t, z) \theta(r)$, where $N(t, z)$ is the average molecular density in a differential slice of fibre at t

and z , and $\theta(r)$ (non dimensional) accounts for the radial dependency. The time dependency of N is applicable to N_1 and N_2 , but not to the total dopant concentration.

The way we normalize both distributions is as follows. If both $\theta(r)$ and $\psi(r)$ were constant (θ_0 and ψ_0 respectively), then γ would be 1, so:

$$\int_0^{a_0} \theta_0 \psi_0 2\pi r dr = 1 \Rightarrow \theta_0 \psi_0 = \frac{1}{\pi a_0^2} \quad (\text{B.5})$$

Since θ_0 is the average dopant concentration:

$$\int_0^{a_0} \theta(r) 2\pi r dr = \int_0^{a_0} \theta_0 2\pi r dr \Rightarrow \int_0^{a_0} \theta(r) r dr = \theta_0 \frac{a_0^2}{2} \quad (\text{B.6})$$

And similarly for the light power:

$$\int_0^{a_0} \psi(r) 2\pi r dr = \int_0^{a_0} \psi_0 2\pi r dr \Rightarrow \int_0^{a_0} \psi(r) r dr = \psi_0 \frac{a_0^2}{2} \quad (\text{B.7})$$

Usually, non-normalized graphs of dopant and light power distributions are reported [2-4]. We call them $\theta_{mn}(r)$ and $\psi_{mn}(r)$ respectively. Their normalized counterparts are proportional to them:

$$\theta(r) = k_1 \theta_{mn}(r); \quad \psi(r) = k_2 \psi_{mn}(r) \quad (\text{B.8})$$

From Equations (B.6) and (B.7), the values of k_1 and k_2 in (B.8) are:

$$k_1 = \theta_0 \frac{a_0^2}{2} / \int_0^{a_0} \theta_{mn} r dr; \quad k_2 = \psi_0 \frac{a_0^2}{2} / \int_0^{a_0} \psi_{mn} r dr \quad (\text{B.9})$$

Finally, from Equation (B.4), and using Equations (B.5), (B.8) and (B.9):

$$\gamma = \frac{a_0^2}{2} \frac{\int_0^{a_0} \theta_{mn}(r) \psi_{mn}(r) r dr}{\int_0^{a_0} \theta_{mn}(r) r dr \int_0^{a_0} \psi_{mn}(r) r dr} \quad (\text{B.10})$$

The data needed to evaluate γ numerically using Equation (B.10) is available from experimental results. The value that we have obtained using [2] is $\gamma=1.43$. Although γ could take any value from 0 to ∞ , realistic values are not very different from 1.4. For example, $\gamma=1.53$ is obtained from [3] and $\gamma=1.36$ from [4].

B.1 References

- [1] I. Ayesta, J. Arrue, F. Jiménez, M.A. Illarramendi eta J. Zubia. “Computational analysis of the amplification features of active plastic optical fibers,” *Phys. Status Solidi A*, vol. 208, no. 8, pp. 1845–1848. 2011.
- [2] A. Tagaya, S. Teramoto, T. Yamamoto, K. Fujii, E. Nihei, Y. Koike eta K. Sasaki. “Theoretical and experimental investigation of rhodamine B-doped polymer optical fiber amplifiers,” *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. 31, pp. 2215-2220. 1995.
- [3] K. Kuriki, T. Kobayashi, N. Imai, T. Tamura, Y. Koike eta Y. Okamoto. “Organic dye-doped polymer optical fiber laser,” *Polym. Adv. Technol.*, vol. 11, pp. 612-616. 2000.
- [4] K. Sasaki eta Y. Koike. “Polymer Optical Fibre Amplifier,” U.S. Patent 5,450,232, 12 September 1995.

C Eranskina

GNU Free Documentation License

In Version 1.3, 3 November 2008

Copyright © 2000, 2001, 2002, 2007, 2008 Free Software Foundation, Inc.

<<http://fsf.org/>>

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

C.0 Preamble

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for

any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

C.1 Applicability and Definitions

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or

(for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

The "publisher" means any person or entity that distributes copies of the Document to the public.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

C.2 Verbatim Copying

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

C.3 Copying in Quantity

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you

distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

C.4 Modifications

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H. Include an unaltered copy of this License.
- I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the ti-

tle, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.

- J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace

the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

C.5 Combining Documents

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

C.6 Collections of Documents

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

C.7 Aggregation with Independent Works

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

C.8 Translation

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

C.9 Termination

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided under this License. Any attempt otherwise to copy, modify, sublicense, or distribute it is void, and will automatically terminate

your rights under this License.

However, if you cease all violation of this License, then your license from a particular copyright holder is reinstated (a) provisionally, unless and until the copyright holder explicitly and finally terminates your license, and (b) permanently, if the copyright holder fails to notify you of the violation by some reasonable means prior to 60 days after the cessation.

Moreover, your license from a particular copyright holder is reinstated permanently if the copyright holder notifies you of the violation by some reasonable means, this is the first time you have received notice of violation of this License (for any work) from that copyright holder, and you cure the violation prior to 30 days after your receipt of the notice.

Termination of your rights under this section does not terminate the licenses of parties who have received copies or rights from you under this License. If your rights have been terminated and not permanently reinstated, receipt of a copy of some or all of the same material does not give you any rights to use it.

C.10 Future Revisions of this License

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document specifies that a proxy can decide which future versions of this License can be used, that proxy's public statement of acceptance of a version permanently authorizes you to choose that version for the Document.

C.11 Relicensing

"Massive Multiauthor Collaboration Site" (or "MMC Site") means any World Wide Web server that publishes copyrightable works and also provides

prominent facilities for anybody to edit those works. A public wiki that anybody can edit is an example of such a server. A "Massive Multiauthor Collaboration" (or "MMC") contained in the site means any set of copyrightable works thus published on the MMC site.

"CC-BY-SA" means the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 license published by Creative Commons Corporation, a not-for-profit corporation with a principal place of business in San Francisco, California, as well as future copyleft versions of that license published by that same organization.

"Incorporate" means to publish or republish a Document, in whole or in part, as part of another Document.

An MMC is "eligible for relicensing" if it is licensed under this License, and if all works that were first published under this License somewhere other than this MMC, and subsequently incorporated in whole or in part into the MMC, (1) had no cover texts or invariant sections, and (2) were thus incorporated prior to November 1, 2008.

The operator of an MMC Site may republish an MMC contained in the site under CC-BY-SA on the same site at any time before August 1, 2009, provided the MMC is eligible for relicensing.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (C) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with ... Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.