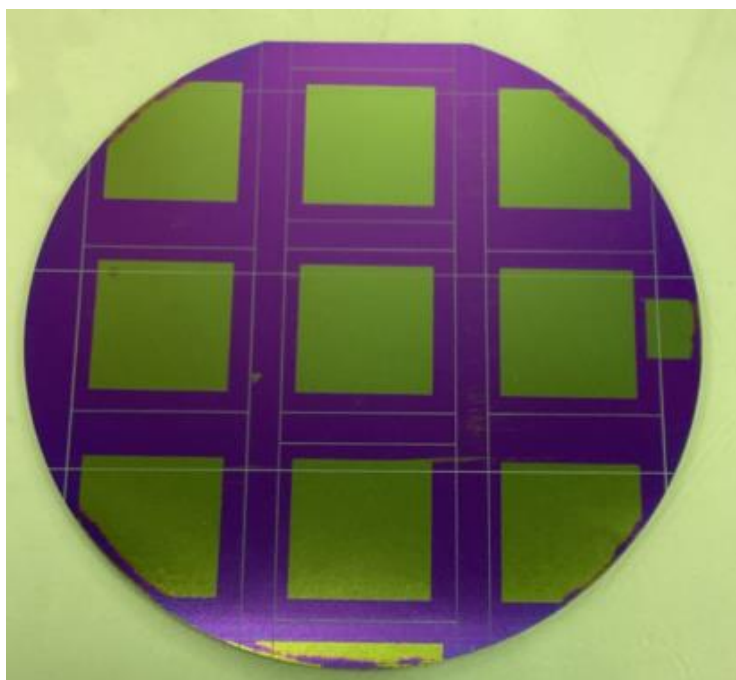


TELEKOMUNIKAZIO INGENIARITZAKO UNIBERTSITATE
MASTERRA

MASTER AMAIERAKO LANA

PEROVSKITA-TANDEM ZELULETARAKO SILIZIOZKO EGITUREN FABRIKAZIOA ETA KARAKTERIZAZIOA



Ikaslea: *Orallo Gil, Elena*

Zuzendaria: *Otaegi Aizpeolea, Aloña*

Ikasturtea: 2023-2024

Data: Bilbon, 2024ko Ekainaren 10a

Laburpena

Lan honetan perovskita-siliziozko tandem zeluletarako siliziozko egitura fabrikatu eta karakterizatu da. Eguzki-zelula hauek potentzial handia erakutsi dute laborategi-inguruneetan, baina muga nabarmenak dituzte industria munduan. EHUko Teknologia Mikroelektronikoaren Institutuko laborategiko gela zurian lan egin da.

Hurrengo fabrikazio-prozesuak aztertu dira: ezpurutasunak ezabatzeko olaten garbiketa, oxidazioa optimizatzeko kalkuluak burutu dira olataren propietate elektrikoak hobetzeko, eta laser bidez isolatu eta ebakitzeko teknika aurreratuak erabili dira, olaten osotasuna eta propietate elektrikoak bermatzeko. Fotolitografia ere erabili da egitura finak definitzeko, industria munduan gutxi erabiltzen den prozesua izanik. BCM eta Teknikerrek ere parte hartu dute fabrikazio prozesuan, BCMk perovskita geruza gehituz eta Teknikerrek ITO geruza. Urrats horietako bakoitza funtsezkoa da eguzki-zelulen kalitatea eta efizientzia bermatzeko.

Fabrikazio-prozesuez gain, olaten karakterizazio sakona egin da parametro kritikoak ebaluatzeko, hala nola serieko erresistentzia, lau puntako neurketen bidez; karga-eramaileen bizitza erabilgarria, fotokonduktantzia teknikaren bidez; eta geruzen uniformetasuna, elipsometroaren eta mikroskopioaren bidez neurtu da. Análisi horiek datu zehatzak ematen dituzte olaten efizientziari eragiten dieten mekanismoak hobeto ulertzeko eta diseinuan eta fabrikazioan etorkizunean hobekuntzak egiteko.

Gako-hitzak: Tandem-zelula, perovskita, silizio, fabrikazio, karakterizazio, oxidazio, difusio, fotolitografia, efizientzia.

Resumen

En este trabajo se ha fabricado y caracterizado la estructura de silicio para células tándem de perovskita-silicio. Estas células solares han demostrado un gran potencial en entornos de laboratorio, pero tienen importantes limitaciones en el mundo industrial. Para llevar a cabo este proyecto se ha trabajado en la sala blanca del laboratorio del Instituto de Tecnología Microelectrónica de la UPV/EHU.

Se han analizado los siguientes procesos de fabricación: se han eliminado las impurezas de la oblea mediante una limpieza, se han realizado cálculos para optimizar la oxidación donde se han mejorado las propiedades eléctricas de la célula y por último, se han utilizado técnicas avanzadas de aislamiento y corte por láser para garantizar la integridad y propiedades eléctricas de las obleas. La fotolitografía también se ha utilizado para definir estructuras finas, siendo un proceso poco utilizado a nivel de fabricación industrial de células solares. Los laboratorios BCM y Tekniker también han participado en el proceso de fabricación, BCM añadiendo la capa de perovskita y Tekniker la capa de ITO. Cada uno de estos pasos es fundamental para garantizar la calidad y la eficiencia de las células solares.

Además de los procesos de fabricación, se ha llevado a cabo una caracterización exhaustiva de las obleas para evaluar parámetros críticos, como la resistencia de capa mediante medidas en la sonda de cuatro puntas, la vida útil de los portadores de carga con la técnica de foto conductancia, y se ha estudiado la uniformidad de las capas utilizando el elipsómetro y microscopio. Estos análisis proporcionan datos precisos para mejorar la comprensión de los mecanismos que afectan a la eficiencia y la durabilidad de las obleas y para introducir mejoras futuras en el diseño y fabricación.

Palabras clave: Células tándem, perovskita, silicio, caracterización, oxidación, difusión, fotolitografía, fabricación, eficiencia.

Abstract

In this project, the silicon structure for perovskite-silicon tandem cells has been fabricated and characterized. These solar cells show enormous potential in laboratory environments but has important limitations in the industrial world. To carry out this project we have worked in the clean room of the laboratory of the Institute of Microelectronic Technology of the UPV/EHU.

The following manufacturing processes have been analyzed: impurities were removed from the wafer through cleaning, and calculations were made to optimize oxidation, thereby improving the electrical properties of the cell. Finally, advanced insulation and laser cutting techniques were employed to guarantee the integrity and electrical properties of the wafers. Photolithography was used to define structures, a process rarely employed in industrial solar cell manufacturing. The BCM and Tekniker laboratories participated in the manufacturing process, with BCM adding the perovskite layer and Tekniker applying the ITO layer. Each of these steps is critical to ensuring the quality and efficiency of the solar cells.

In addition to the fabrication processes, extensive characterization of the wafers has been conducted to evaluate critical parameters. Layer resistance was measured using four-point measurements, while charge carrier lifetime was assessed using the photo conductance technique. The layer uniformity was examined with the ellipsometer and microscope. These analyses provide accurate data to enhance the understanding of the mechanisms affecting wafer efficiency and durability, facilitating future improvements in design and fabrication.

Key words: Tandem cells, perovskite, silicon, characterization, oxidation, diffusion, photolithography, fabrication, efficiency.

Aurkibidea

1.	Sarrera	1
2.	Testuingurua.....	3
3.	Helburuak	4
4.	Lanak dakartzan onurak.....	5
5.	Artearen egoera.....	6
5.1	Eguzki zelulen funtzionamendua.....	6
5.2	Eguzki espektroa	7
5.3	Tandem zelulak.....	9
5.4	Perovskita eta Si tandem zelulak	11
6.	Aukeren analisia	12
6.1	Fotolitografia eta serigrafia.....	12
6.1.1	Fotolitografia	12
6.1.2	Serigrafia	13
6.1.3	Konparaketa.....	13
6.2	Difusioa egiteko aukerak.....	14
6.2.1	Difusioa serigrafia erabiliz	14
6.2.2	Difusioa fosforo labea erabiliz	15
6.2.3	Konparaketa.....	15
6.3	Mozketa egiteko aukerak	16
6.3.1	Laser bidezko mozketa.....	16
6.3.2	Ebakitzaile bidezko mozketa	16
6.3.3	Konparaketa.....	17
7.	Arriskuaren analisia	18
7.1	Olataren apurketa.....	18
7.2	Makinaren apurketa	18
7.3	Giza-akatsa.....	19
7.4	Probabilitate-eragin matrizea.....	19
8.	Proposatutako irtenbidearen deskribapena.....	20
8.1	Tandem zelulen geruzak.....	20
8.2	Fabrikazio prozesuak	22
8.2.1	Olataren garbiketa	22
8.2.2	Difusioa eta oxidazioa.....	23
8.2.3	Fotolitografia	26
8.2.4	ITO geruza	29
8.2.5	Laser isolamendua eta mozketa	29
8.3	Karakterizazioa prozesuak.....	31
8.3.1	Geruza erresistentziaren neurketa	31
8.3.2	Bizitza-denbora	33

8.3.3	Elipsometroa	35
8.3.4	I-V kurbaren neurketa.....	38
9.	Lortutako emaitzak.....	39
9.1	Olaten garbiketa.....	39
9.2	Fosforo dopaketa.....	41
9.3	Karakterizazioa.....	42
9.3.1	Lodiera neurtu.....	42
9.3.2	Geruzaren erresistentziaren neurketa.....	43
9.3.3	Bizitza-denbora.....	43
9.4	Oxidazioa.....	45
9.5	Fotolitografia.....	47
9.6	ITO geruza.....	51
9.7	ITO Geruzaren erresistentziaren neurketa.....	52
9.8	Elipsometro bidezko karakterizazioa	52
9.9	Laser isolamendua eta mozketa.....	55
9.9.1	Laser isolamenduaren konprobaketa	56
9.9.2	Laser mozketa	57
9.10	Mikroskopiaarekin isolamenduaren azterketa.....	58
9.10.1	IR eta GR arteko konparaketa.....	58
9.10.2	IR isolamendua eta mozketa	61
9.11	BCMtik jasotako emaitzak.....	63
9.12	Emaitzen ondorioa	64
10.	Lanerako erabilitako metodologia.....	66
10.1	Lanaren zereginak	66
10.2	Gantt diagrama	68
11.	Alderdi ekonomikoak	71
11.1	Barne orduak.....	71
11.2	Amortizazioak	72
11.3	Gastuak	72
11.4	Aurrekontu totala	73
12.	Ondorioak.....	74
13.	Erreferentziak.....	75
Eranskina: SiO ₂ -aren kolore-karta		77

Irudien aurkibidea

1. Irudia. Ikerketa laborategietan garatutako eguzki-zelula, 1975etik hona.....	2
2. Irudia. Garapen Jasangarrirako Helburua.....	5
3. Irudia. Eguzki espektroa uhin-luzeraren arabera.....	7
4. Irudia. Espaziorako eta Lurreko erabilerako zelulen eguzki-espektro estandarra.....	8
5. Irudia. Uhin luzera eta energiaren arteko erlazioaren grafika.....	10
6. Irudia. Bi junturako tandem eguzki-zelula.....	10
7. Irudia. Geruzen eskema.....	21
8. Irudia. HF, NaOH eta H ₂ O bainuak egiteko kanpaia.....	22
9. Irudia. RCA egiteko kanpaia.....	23
10. Irudia. Oxidazio labea.....	24
11. Irudia. Fotolitografia gelako spinera.....	26
12. Irudia. Argi esposiziorako gailua.....	27
13. Irudia. Erretxina lehortzeko labea.....	28
14. Irudia. IR/GR laserra.....	30
15. Irudia. Laserraren barrualdea.....	30
16. Irudia. Lau puntako neurgailua.....	32
17. Irudia. 4 puntako makina. Serie erresistentzia neurketa egiteko.....	32
18. Irudia. Bizitza-denbora neurketa zirkuitua.....	34
19. Irudia. Bizitza-denbora neurtzeko makina.....	35
20. Irudia. Elipsometroaren eskema.....	36
21. Irudia. Elipsometroa.....	37
22. Irudia. Siliziozko olata.....	39
23. Irudia. Si olata garbiketa eta gero.....	41
24. Irudia. Fosforo labetik ateratako txanda.....	41
25. Irudia. Lodiera neurtzeko makina.....	42
26. Irudia. Geruza erresistentziaren neurketa puntuak.....	43
27. Irudia. Konduktantzia neurgailua.....	44
28. Irudia. Osziloskopia eta ordenagailuaren grafikak.....	44
29. Irudia. Olata oxidazioa egin ondoren.....	47
30. Irudia. Olataren geruzak. Fotolitografia hasi baino lehen.....	47
31. Irudia. Olatak erretxina kokatu ondoren.....	48
32. Irudia. Olataren geruzak. Erretxina kokatuta.....	48
33. Irudia. Litografian erabilitako maskara.....	49
34. Irudia. Olata argi esposiziorako makinan kokatuta.....	49
35. Irudia. Degradatutako erretxina kendu ondoren geratzen diren geruzak.....	50
36. Irudia. Ikusgarri zegoen SiO ₂ geruza garbituta.....	50
37. Irudia. Fotolitografia amaituta lortzen den geruzen eskema.....	51
38. Irudia. Oxidazio leihoak ireki ondoren lortutako olata.....	51
39. Irudia. ITO geruza.....	52
40. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoa. 1. lagina.....	53
41. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoa. 2. lagina.....	54
42. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoa. 3. lagina.....	54
43. Irudia. Mozketa eta isolamendua egindako olata.....	56
44. Irudia. Isolamenduaren marrazkia.....	56

45. Irudia. Isolamenduaren emaitza.....	57
46. Irudia. Mozketak eta isolamendua.....	58
47. Irudia. IR isolamendua.....	59
48. Irudia. GR isolamendua.....	60
49. Irudia. Isolamenduaren argazkia.....	61
50. Irudia. Isolamenduaren argazkia, altuera grafika (I).....	62
51. Irudia. Isolamenduaren argazkia, altuera grafika (II).....	62
52. Irudia. Laser mozketa.....	63
53. Irudia. Tandem zelularen geruzen eskema.....	63
54. Irudia. BCMtik jasotako lehenengo eta bigarren txandaren zelularen argazkia.....	64
55. Irudia. Gantt diagrama.....	70

Taulen aurkibidea

1. Taula. Balantze elektrikoa 2023 urtean REE arabera.....	1
2. Taula. Eguzki zelulen efizientzia ehunekoa.....	8
3. Taula. Fotolitografia eta serigrafia arteko konparaketa.....	14
4. Taula. Serigrafia eta labearen bitarteko difusioaren konparaketa.....	16
5. Taula. Laser mozketaren eta ebakitzailaren arteko konparaketa.....	17
6. Taula. Probabilitate-eragin matrizea.....	19
7. Taula. Geruza erresistentziaren neurketak.....	43
8. Taula. Olataren bizitza-denboraren emaitzen laburpena.....	45
9. Taula. Oxidazio prozesuen kalkuluak.....	46
10. Taula. ITO geruza erresistentziaren neurketak.....	52
11. Taula. Elipsometroaren doiketa datuak.....	53
12. Taula. Elipsometroaren emaitzak.....	54
13. Taula. Laserrean egindako doiketak.....	55
14. Taula. IR laserrarekin egindako frogak.....	58
15. Taula. GR laserrarekin egindako frogak.....	59
16. Taula. Serie erresistentziaren neurketa.....	61
17. Taula. BCM laborategitik jasotako zelulen neurriak.....	64
18. Taula. Lan paketeen azalpena.....	66
19. Taula. Lan-pakete eta azpipakete bakoitzaren iraupena.....	69
20. Taula. Barne orduak.....	71
21. Taula. Amortizazioak.....	72
22. Taula. Produktu kimikoen aurrekontua.....	72
23. Taula. Gas botilen aurrekontua.....	73
24. Taula. Gastuak.....	73
25. Taula. Aurrekontu totala.....	73

Akronimoen zerrenda

REE: Red Eléctrica de España

NREL: National Renewable Energy Laboratory

GJH: Garapen jasangarrirako helburuak

CB: Conduction Band

VB: Valanced Band

AM1.5G: Air Mass 1.5 Global

AM1.5D: Air Mass 1.5 Direct

AM0: Air Mass

NREL: Energia Berriztagarrien Laborategi Nazionala

Si: Silizio

P: Fosforo

TiM: Teknologia Mikroelektronikoaren Institutua

IR: Infrared

GR: Green

UV: Ultraviolet

RCA: Radio Corporation of America

HF: Hidrogeno fluoruro

NaOH: Sodio hidroxido

SiO₂: Silizio dioxidoa

ITO: Indium Tin Oxid

Voc: Open-circuit Voltage

Isc: Short-circuit Current

NH₃: Amoniako

H₂O₂: Peroxido hidrogeno

HCl: Azido klorhidriko

IPA: Isopropanol

N: Nitrogeno

O₂: Oxigeno

POCL₃: Fosforo oxikloruro

1. Sarrera

Gaur egun, badakigu zein garrantzitsua den agortzen ez diren eta ingurumena zaintzen duten energiak erabiltzea. Energia iturri hauen artean, eguzki-energia etorkizun handiko alternatiba gisa nabarmentzen da. Espainiako sare elektrikoak (REE) dio, hurrengo taulan azaltzen den moduan, 2023an energia berriztagarrietatik 134.321 GWh sortu direla. Hauetatik, 37.332 GWh eguzki energia fotovoltaikotik atera ziren eta energia berriztagarri erabiliena izan zen energia eolikoaren ondoren, 1.taulan agertzen den bezala. Honek frogatzen du eguzki-energia fotovoltaikoak daukan garrantzia [1].

1. Taula. Balantze elektrikoa 2023 urtean REE arabera.

Energia-iturria	Sortutako energia (GWh)
Hidraulikoa	25.273
Eolikoa	62.569
Eguzki energia fotovoltaikoa	37.332
Eguzki termikoa	4.694
Hidroelektrikoa	17
Bestelakoak	3.590
Hondakin berriztagarriak	846
Energia sorkuntza berriztagarriak	134.321

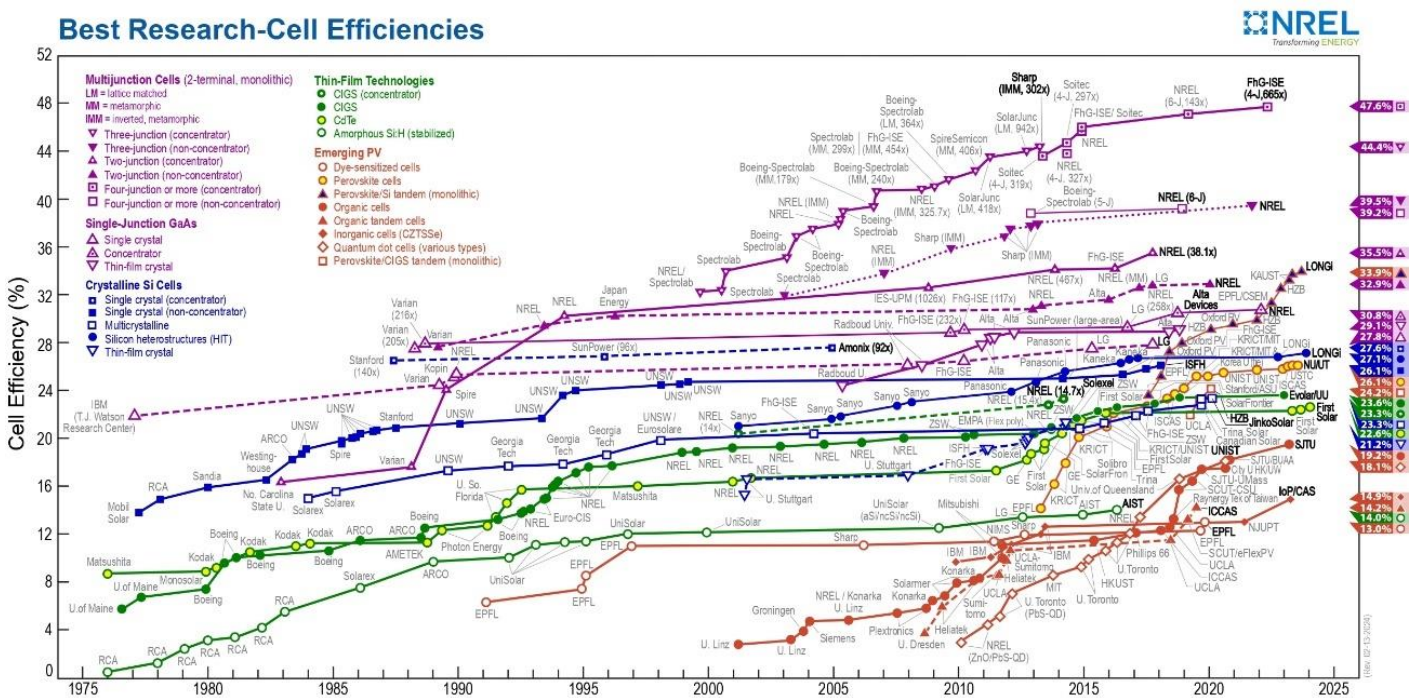
Eguzki-zelula material erdieroalez osatutako gailuak dira, ezinbestekoak argi energia, energia elektrikora bihurtzeko. Eguzki-zelula, eguzki-erradiaziotik elektrizitatea sortzeko erabil daitekeen gailua da. Zelula hauek argi energia jaso eta energia elektrikoa lortzen dute.

Eguzki-zelulei ikerketa zabala egin zaie, eraginkortasuna hobetzeko eta haiei lotutako kostuak murrizteko. *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) argitaratutako *Best Research-Cell Efficiencies* grafikoak arlo horretako aurrerapen berrien ikuspegi orokorra ematen du, etorkizun handieneko teknologiak nabarmenduz.

Grafikoak eguzki-zelulen arloko aurrerapen garrantzitsuen ikuspegi orokorra ematen du, eta hainbat kategoriatan sailkatzen ditu, energia-bihurketaren motaren eta eraginkortasunaren arabera. Grafikoan ageri diren teknologien artean daude, besteak

beste, lotura anitzeko eguzki-zelulak, *multijunction cells*; silizio kristalinozko eguzki-zelulak, *crystalline Si cells*; film meheko teknologiak, *thin-film technologies*; PV, *emerging PV* teknologia berrietara irekiak.

Analisi honen testuinguruan, garrantzitsua da azpimarratzea perovskita/Si *two-junction* zeluletan oinarritzen dela bereziki. Grafikak agerian uzten du azken urteetan eguzki-zelulen garapenean izandako aurrerapen nabarmena, bai eta azaleratzen ari diren teknologietan, perovskita/Si motako tandem zelulen kasuan, esploratzeko dagoen potentziala ere, etorkizun handiko bidea baitira eguzki-energiaren eraginkortasuna eta bideragarritasun ekonomikoa hobetzeko [2].



1. Irudia. Ikerketa laborategietan garatutako eguzki-zelula, 1975etik hona.

Lan hau perovskita/Si tandem eguzki-zeluletan oinarritzen da, *multijunction* eguzki-zelulen taldean kokatzen direnak. Tandem eguzki-zelulek eguzki-energiaren eraginkortasuna handitzeko eta energia fotovoltaikoaren bideragarritasuna areagotzeko ahalmen handia erakutsi dute.

Dokumentu honetan lehenengo testuingurua lantzen da, eguzki-zelulen teknologia egungo egoera eta hobekuntza beharrak aztertuz. Ondoren, lan honen helburuak aurkezten dira. Horrez gain, fabrikazio prozesuak, karakterizazio metodoak eta emaitzen azterketa zehazten dira, betiere lanaren onurak eta oinarri teorikoak azpimarratuz. Azkenik, ondorioetara iristen da, lortutako emaitzak eta etorkizuneko ikerketa lerroak laburbilduz.

2. Testuingurua

Proiektu hau, UPV/EHUko Teknologia Mikroelektronikoaren Institutuan, TiM, egin da. Mikroelektronikaren eta eguzki-zelulen arloan egindako ikerketak aintzat hartzen duen ikerketa-zentroa da. Institutuak areto zuri bat dauka gailu elektronikoak fabrikatzeko, baita gailuen karakterizazio optiko eta elektronikorako laborategiak eta tailer mekaniko bat ere. Ikerketa-taldea, beste proiektuen artean, eguzki-zelulen efizientzia hobetzeko teknologia eta metodo berriak ikertzen aritzen da.

Azken urteotan institutuan perovskita eta Si tandem eguzki-zelulen komertzializazioa oztopatzen duten erronka tekniko eta zientifikoak aztertzen du. Zelula hauek potentzial handia erakutsi dute laborategi inguruneetan eta %47ko efizientziara arte hel daitezke [3], baina eskala handian aztertzean zenbait faktorek mugatzen dute. Hutsune teknologiko handia dago fabrikazio-enpresetan, ikerketa laborategi mailan baino ez baitira ezagutzen.

Azken urtean egin dudana perovskita Tandem eguzki-zelulen garapenean zentratu da. Denbora honetan, Tandem zeluletan erabilitako egitura eta materialak optimizatzearen garrantzia ikusi da. TiMek beti egin du lan teknika berriak industriara hurbiltzeko. Tandem eguzki-zelulak teknologia puntako adibide dira, eta laborategian lehen aldiz landu dira. Hori dela eta, fabrikazio-teknikak, besteak beste, fotolitografia eta oxidazioa.

3. Helburuak

Lan honen helburua tandem zelulak fabrikatzeko prozesuak hobetzea eta optimizatzea da, perovskita-tandem zeluletarako siliziozko (Si)egituretan.

Helburua burutzeko, hurrengo azpihelburuak jarraitu dira:

1. Tandem zelulen fabrikazio osoa burutzea, honako prozesuak barne hartuz:
 - a. Olataren garbiketa: Zelulen fabrikazio prozesuaren hasieran, olatetan garbiketa kalitate eta fidagarritasun handiena bermatzeko.
 - b. Difusioa eta oxidazioa: Materialen difusioa eta oxidazioa prozesuak ikasi eta burutu, zelulen egonkortasuna eta efizientzia hobetzeko.
 - c. Fotolitografia: Zelulen egitura zehatzak sortzeko fotolitografia teknika aplikatu.
 - d. Laser isolamendua eta mozketa: Laserraren erabilera olaten mozketa eta isolamendua lortzeko.
2. Karakterizazio prozesuaren kalitatea eta zelulen efizientzia bermatzeko, hainbat karakterizazio-prozesua burutzen ikasi beharko da:
 - a. Serie erresistentziaren neurketa: Zelulen serie erresistentzia neurtzea eta interpretatzea, haren eraginkortasuna aztertzeke.
 - b. Bizitza-denbora: Zelularen egonkortasuna eta iraunkortasuna bermatzeko, bizitza-denbora aztertu da.
 - c. Elipsometroa: Materialaren lodiera neurtzeko eta honen kalitatea ziurtatzeko elipsometroaren erabilera.
 - d. Mikroskopiaoren bidezko azterketa: Laser isolamendua eta mozketa prozesuak burutzea, olataren zehaztasuna eta kalitatea egiaztatzeke.

4. Lanak dakartzan onurak

Atal honetan, proiektu honek dakartzan onurak aztertuko dira. Aurreko ataletan azaldutako erronkak gaindituta, proiektu honek eguzki-zelulak etorkizunean industrializatzeko bidea hobetzeko ahalmena du. Alde batetik onura teknikoak aztertuko dira, industria aldean. Bestetik, onura sozialak Garapen Jasangarrirako Helburuekin lotura eginez.

Onura teknikoek nabarmentzen dute proiektuaren garrantzia eta eragina industriaren garapen eta aplikazio praktikoan. Tandem-zelulekin eguzki-energiaren eraginkortasuna handitzea lortzen da. Bihurketan eraginkortasun handiagoa lortuz, eguzki-energia gehiago aprobetxatu daiteke. Fabrikazio prozesuak optimizatuz eta kostuak murriztuz, materialen erabilera efizienteagoa lortzen da. Gainera, TiM laborategiak fabrikazio prozesuetan konfiantza hartuko du. Fabrikazio eta karakterizazio prozesu hauek, hala nola, fotolitografia eta oxidazioa, beste teknologia fotovoltaikoekin integratzeko aukera ematen du, TiM beste teknika berrietara hurbiltzeko aukera emanez.

Eguzki-zelulen teknologia ikerketa eta garapena bat dator, sakonki, 7. Garapen Jasangarrirako Helburuarekin (GJH): Energia irisgarria eta ez kutsagarria. Helburua guztiontzako energia eskuragarria, segurua, jasagarria eta modernoa lortzea da. Helburu hori funtsezkoa da klima-aldaketari aurre egiteko, garapen ekonomiko sustatzeko eta desberdintasunak murrizteko. Eguzki-energia iturri garbia eta berriztagarria denez, funtsezkoa da energia-sistema iraunkorragotarako trantsizioa egiteko.

GJH honen esparruan, proiektuak bat dator helburu hauekin [4]:

37. Teknologiaren eta enpresen garapena sostengatzea energia-iturri berriztagarri eta jasagarrien erabilera sustatzeko.

38. Aurrezpen eta eraginkortasun energetikoko proiektuak bultzatzea.



2. Irudia. Garapen Jasangarrirako Helburua.

5. Artearen egoera

Atal honetan proiektua ulertzeko beharrezkoak diren oinarrizko kontzeptuak azaltzen dira. Eguzki-zelulen funtzionamendua, eguzki-espektra eta tandem zelulen azalpen teorikoa:

5.1 Eguzki zelulen funtzionamendua

Eguzki-zelulen funtzionamenduan energia aldaketa gertatzen da. Eguzkitik lortutako argi-energiatik, energia elektrikorako aldaketa gauzatzen da. Eguzki-zelularen egiturak karga positibodun eskualde erdieroale bat karga negatibodun eskualde erdieroale batekin kontaktuan jartzen du. Eguzki-zelulen funtzionamendua, efektu fotovoltaikoan oinarritzen da. Efektu hau aztertzeko hiru prozesu nagusi bereiz daitezke:

- Karga eramaileen sorrera: Eguzki-zelula, eguzki-fotoien eraginpean dagoenean, kristal sareko elektroiak kitzikatu eta balentzia-bandatik (VB) kondukzio-bandara (CB) igaroko dira, elektroiak kondukzio-bandan aske mugi daitezke kristal saretik. Prozesu honen bitartez elektroik/hutsune bikote askeak sortzen dira.
- Karga eramaileen bereizketa: Karga-eramaileak askatu ondoren, elektroiak eta hutsuneak, eguzki-zelulan p-n juntura bitartez, elektroik/hutsune bikoteak banandu daitezke. Junturak elektroiak erakartzen ditu n *negative* karga duen aldera eta hutsuneak p *positive* karga duen aldera. Prozesu honen bitartez, eramaileen mugimendua sortzea lortzen da.
- Karga eramaileen bilketa: Banandutako karga-eramaileak, eguzki-zelularen muturretako konektoreetara heltzen dira, kanpo zirkuitu batera bideratuz. Elektroiak zirkuitu honetatik gidatuta, hutsunearekin birkonbinatu aurretik korrante elektrikoa sortuko du.

Eguzki-zelulen efizientzia, eguzki-argitik lortutako energia-elektriko bihurtzeko gaitasunaren ehunekoia da. Efizientzia honen balioa hainbat faktore teknologiko eta fisikoren arabera da, hala nola, erabilitako materiala, zelularen diseinua eta fabrikazio-prozesua. Efizientzia handiagoa lortzea garrantzitsua da eguzki-energia erabilera eraginkorragoa egiteko eta kostua murrizteko. Eguzki-zelulen efizientzia maximizatzeke, teknologia berrien garapena eta materialen hobekuntza etengabeak dira ikerketa arlo nagusietan.

5.2 Eguzki espektroa

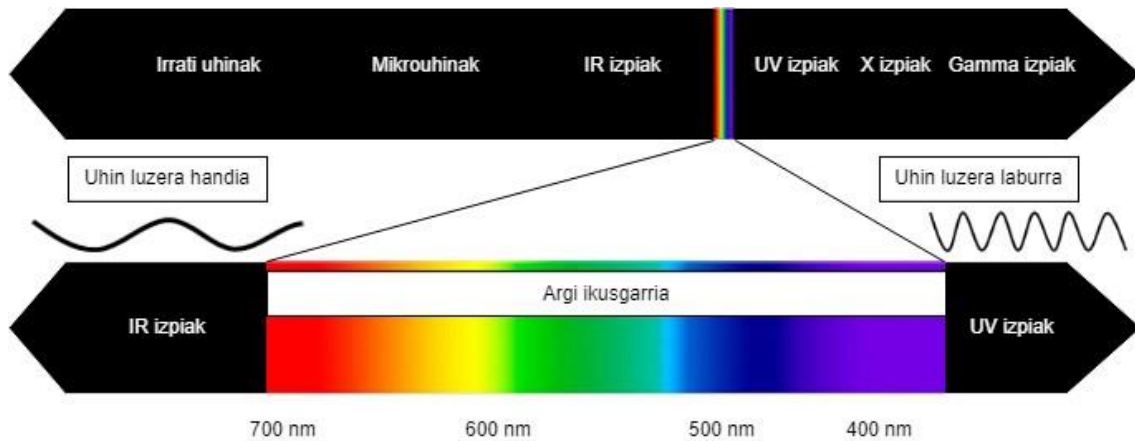
Eguzki-energia ororen iturria, eguzkiaren nukleoan sortzen da. Nukleoan hidrogenozko 4 nukleo fusionatu egiten dira, heliozko atomo bat sortuz. Aldaketa honen ondorioz, energia txiki bat transformatzen da eguzki energia moduan. Eguzki-erradiazioa uhin elektromagnetiko bitartez hedatzen da. Honen parametroak uhin-luzera eta frekuentzia dira, hurrengo formulaz azaltzen den moduan [5]:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Uhin-luzera eta frekuentzia alderantzizko proportzionalak dira. Hau da, frekuentzia altuko uhinek potentzia txikia sortzen dute, frekuentzia baxukoek aldiz, potentzia handiagoa.

Eguzki-espektroa, erradiatutako energiaren aldaketa, uhin-luzeraren funtzioaren erreproduktzio grafikoa da. Espektro hau banda ezberdinetan banatzen da, hurrengo irudian ikusten den moduan [6].

Gure kasurako, eguzki-energian banda garrantzitsuenak banda ultramoreak (UV), banda ikusgaiak eta banda infragorriak (IR).



3. Irudia. Eguzki espektroa uhin-luzeraren arabera.

Eguzki-zelulen efizientzia ebaluatzeko, eguzki-espektroko estandarrak erabiltzen dira. AM1.5G eta AM1.5D, lurraren azalera baldintza atmosferiko desberdinetan iristen den batezbesteko eguzki-erradiazioa da. AM1.5D espektroa zuzeneko argiztapena adierazten du, AM1.5Gk aldiz, baldintza errealista bat irudikatzen du. Bestalde, AM0 adierazpenak kanpo-espazioko eguzki-erradiazioa adierazten du, atmosferaren eraginik

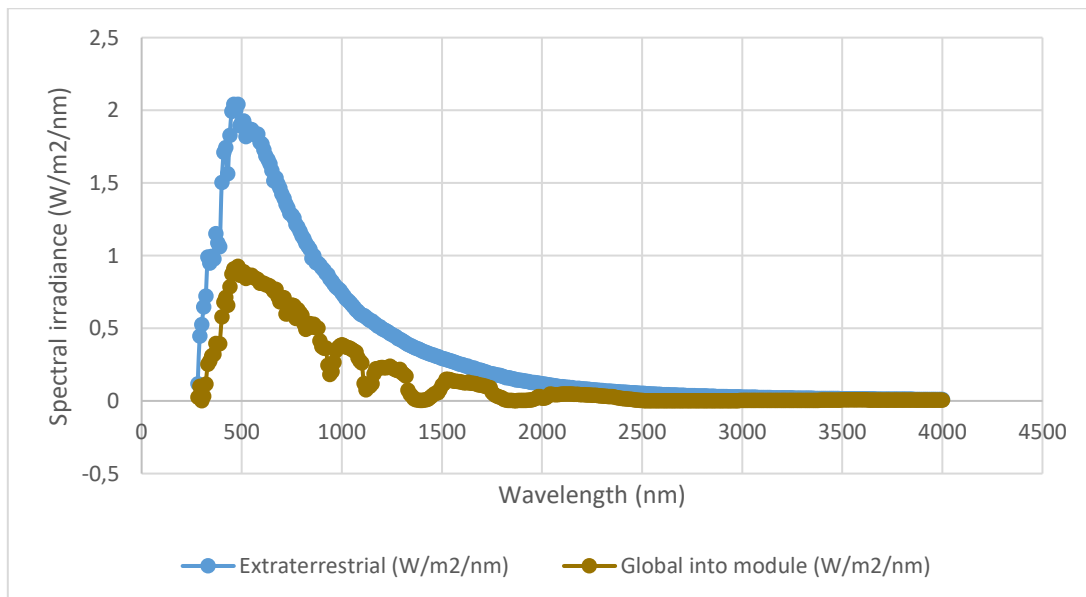
gabe. Hurrengo taulan, eguzki-espektroaren arabera, siliziozko eguzki-zelula batek lortzen duen efizientzia maximoa azaltzen da ehunekotan [7] [8].

2. Taula. Eguzki zelulen efizientzia ehunekoa.

Eguzki-espektroa	Efizientzia maximoa
AM1.5Global	%33
AM0	%49

Irudian, modu grafiko batean, eguzki-espektro bakoitzak lortzen duen irradiantzia maximoa uhin-luzeraren arabera ikusten da. Uhin-luzera bakoitzeko fotoiek energia jakin bat dute, eta energia horrekin heltzen dira eguzki-zelulara.

Material erdieroale batetik elektroik/hutsune pareak sare kristalinotik askatzeko, energia minimo bat behar da, eta energia hori debekatutako banda izeneko propietate batekin erlazionatuta dago. Silizioaren kasuan, debekatutako banda 1,4 eV-koa da, eta horrek esan nahi du elektroik/hutsuneak askatzeko 1,4 eV edo gehiagoko energia duten fotoiak behar direla. Hori dela eta, eguzki-espektro osoan, 900 nm azpitik uhin-luzerako fotoiak bakarrik dira aprobetxagarriak, eta gainontzekoak ez dira erabilgarriak eguzki-zelula horietan [9].



4. Irudia. Espaziorako eta Lurreko erabilerako zelulen eguzki-espektro estandarra.

5.3 Tandem zelulak

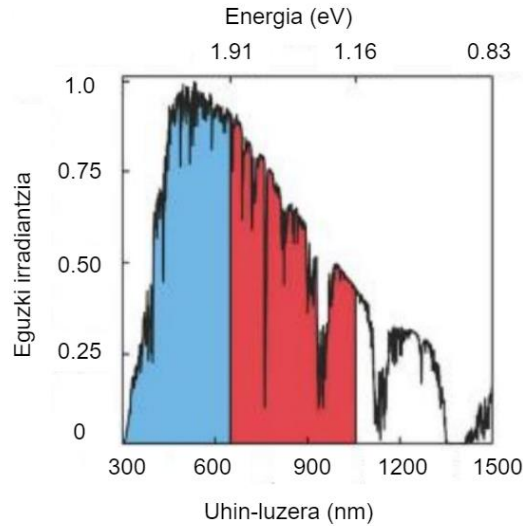
Aurreko atalean ikusi den moduan, eguzki-zelulen efizientzia hobetu nahi bada, beharrezkoa da juntura bakarreko zelula hobetzea, 900 nm-tik gorako fotoiak alferrik ez galtzeko. Tandem zelulek eguzkitik argi-espektroaren xurgatze efizienteagoa eskaintzen dute, eta ondorioz tandem-zelulen bitartez eguzki-efizientzia hobetu daiteke [10].

Tandem eguzki-zelulek berrikuntza nabarmena dakarte teknologia fotovoltaikoan. Eguzki-argia elektrizitate bihurtzeko eraginkortasuna handitzeko diseinatu dira, eguzki-espektroaren zati handi bat aprobetxatuz. Ohiko eguzki-zelulek material erdieroale bakarra erabiltzen dute eguzki-argia xurgatzeko. Tandem eguzki-zelulek aldiz, eguzki-zelulak pilatu egiten dituzte sandwich erara, eguzki-argiaren espektroa hobeto aprobetxatzeko [11].

Sandwich egitura horretan, energia gutxiago duten, uhin-luzera handieneko fotoiak, goiko geruzetatik pasa daitezke xurgatu gabe. Fotoi hauek tandem eguzki-zelularen beheko geruzetara iristen dira, eta geruza hauek banda debekatu txikiko erdieroalez osatuta daude, xurgapen-koefiziente handi batekin. Beheko geruzak goiko geruzetan zehar igarotzen diren uhin-luzera handieneko fotoiak eraginkortasunez xurgatzeko diseinatuta daude. Goiko sandwichak aldiz uhin-luzera txikiko fotoi oso energetikoak xurgatuko ditu eta korronea eragin. Modu honetan, eguzki-espektroaren tarte zabalagoa aprobetxatzen da, eta tandem eguzki-zelularen eraginkortasun orokorra handitzen da.

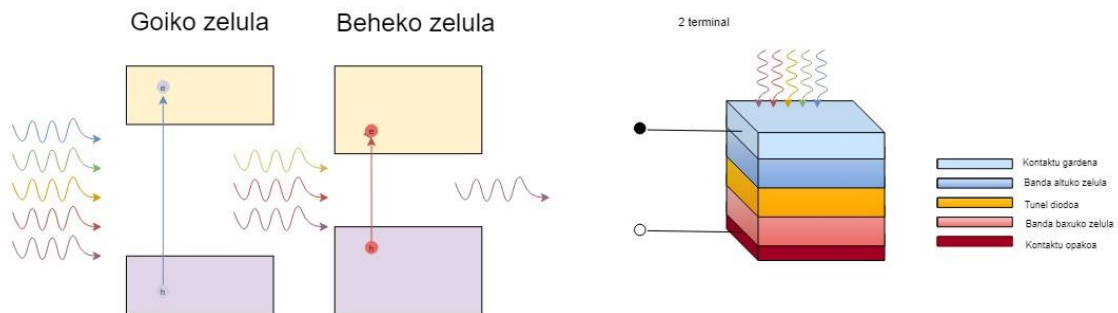
Aurreko azalpena ikusita, tandem eguzki zelula hiru zati nagusietan bananduko da:

- Goiko zelula: Debekatutako banda-zabalera handia. IR eta ikusgai den banda ezin du xurgatu.
- Tunel diodoa: Geruza honen helburua bi zelulen arteko egokitzapen-lanak egitea da. Tunel diodorik gabe, lortu nahi dugun prozesu fotovoltaiko honen ondoren, lortutako tentsioaren kontrako beste tentsio bat sortuko litzateke, eta horrek tandem zelulen eraginkortasuna galtzea ekarriko luke
- Beheko zelula: Debekatutako banda zabalera txikia. IR eta ikusgaia den banda zabalera xurgatzeko eta elektrizitatera bihurtzeko ahalmena dauka.



5. Irudia. Uhin luzera eta energiaren arteko erlazioaren grafika.

Goiko irudian, lehen azaldu den moduan, urdin koloreko zatia, hau da, uhin-luzera baxuak potentzia handiagoa dauka. Gorriz agertutako zatia aldiz, uhin-luzera handitzen den bitartean, potentzia txikiagotzen da. Potentzia eta uhin-luzera alderantziz proportzionalak dira.



6. Irudia. Bi junturako tandem eguzki-zelula.

Aurreko irudian, modu eskematiko batean, tandem zelulen funtzionamendua ikusten da. Lehenengo irudian, juntura bikoitzeko tandem zelularen errepresentazioa ikusten da, izpi urdinak tandem zelularen lehenengo zelulak xurgatzen ditu eta izpi gorriak azpiko zelulak, ahalik eta izpi gutxien galtzen dira. Bigarren irudian, bi terminaleko tandem zelularen errepresentazioa agertzen da, bloke guztiak duen zatiak erakutsiz [12] [13].

5.4 Perovskita eta Si tandem zelulak

Perovskita eta Silizio tandem zelulak, eraginkortasun handiko, kostu txikiko eta eguzki-espektroari erantzun fotovoltaikoa zabaltzeko ahalmen handiko konbinazioa eskaintzen dute [14].

Perovskitek, kostu txikiko materiala da, aurrerapen nabarmena izan dute aplikazio fotovoltaikoetarako eraginkortasun eta egonkortasun aldetik. Hobekuntza azkarrak lortu dira perovskitazko eguzki-zelulen efizientzia, honen ondorioz, etorkizun handiko lehiakide bihurtzen ditu ohiko teknologia fotovoltaikoekin, hala nola juntura bakarreko eguzki-zelulekin.

Perovskita eta siliziozko tandem zelulak estrategia eraginkorra eskaintzen dute eguzki-energia bihurtzeko efizientzia handitzeko. Silizioak eraginkortasun handia du uhin luzera handiko argia xurgatzeko, perovskitek, berriz, argi ikusgarriaren tartean xurgapen ahalmen handia dute. Konbinatzean, eguzki-argiaren espektro osoa eraginkortasunez aprobetxatzen da, eta horrek energia-bihurketaren efizientzia handia dakar. Gainera, perovskitek fabrikazio kostu txikia dute, eta beraz, aplikazio industrialetarako aukera erakargarria dira.

6. Aukeren analisisa

Tandem zelulen fabrikazioa burutzean, zenbait erabaki hartu behar izan dira. Prozesu bakoitzean egoera ezberdinak kontuan hartuta eta laborategian eskura zegoen materialarekin, posible ziren aukeren analisisa egin da. Prozesu hau beharrezkoa da, daukagun aukerak eta egoera bakoitzerako egokiena denaren azterketa kritikoa egiteko. Hemendik abiatuta, hurrengo erabakiak hartu dira: Analisi hau burutzeko, hiru prozesu burutzeko bi aukera konparatu dira. Konparaketa bakoitzean, faktore ezberdinak aztertu dira, kasu bakoitzerako moldatuta.

Analisisa egiteko, batura haztatua (BH) deituriko prozedura erabiliko da [15]. Aukerarik onena zein den erabakitzeo, lehenengo konparatuko den faktore bakoitzari pisua eman behar zaio. Gero, aukera bakoitzari, aztertutako faktorearen arabera puntuazio bat emango zaio. Hurrengo formula erabilita, aztertzen den aukera bakoitzak balio bat lortuko du.

$$BH = \sum_i^n p_i \cdot x_i \quad (2)$$

Formula honetan, p faktorearen pisua adierazten du eta x emandako kalifikazioa. BH, batura haztatua, analisi bakoitzean konparatuko den balioa izango da.

6.1 Fotolitografia eta serigrafia

Bi prozesu hauek funtsezkoak dira erdieroaleen fabrikazioan, siliziozko olatetan eta beste substratu batzuetan eredu zehatzak eta egitura konplexuak sortzeko aukera ematen baitute. Ataza hau burutzeko laborategian bi aukera aurkitzen dira.

6.1.1 Fotolitografia

Prozesu honetan, argazki maskarak erabiltzen dira siliziozko olataren gaineko geruza fotosentikor batean patroiak zehazteko. UV argia maskararen bidez adierazten da, eta patroiak geruza fotosentikorrera transferitzen du. Ondoren, patroiak olatara transferitzeko errebelatze prozesu bat egiten da. Patroi honetan, olatan materialen deposizioa egingo da. Azkenik, behin nahi den patroian deposizioa egin ondoren, gainerako erretxina kentzen da.

Produktibitateari dagokienez, nahiko altua eduki dezake. Industrian, aldi berean argi esposiziora, olata asko koka daitezke eta txanda bakoitzean olata askoren maskara egin. Kasu honetan, eskura dagoen makina argi esposizioa olata bakarrari egin dezake eta honek prozesua moteltzen du. Honez gain, olatek esposizioaren aurretik labean egon

behar den denbora kontuan hartzen bada askoz motelagoa egiten da prozesua. Bereizmenari dagokienez, metodo honi esker patroiz zehatzen transferentzia egin daiteke. Faktore honek garrantzi handia hartzen du lortu nahi den emaitzaren arabera. Ekonomia aldetik, makinak garestiak izan arren, urte asko irauten duen makina da.

6.1.2 Serigrafia

Beste aldetik, serigrafiak, gainazal iragazkorrak dituen oihalezko sare bat erabiltzen du, kokatu nahi den materiala olataren eremu zehatzetara transferitzeko. Teknika hau erabilgarriagoa da patroiz lodiagoak behar dituzten aplikazioetarako [16].

Serigrafiaren produktibitatea aplikazioaren arabera produktibitate hobeago izan daiteke, adibidez txanda handiak egin daitezkeelako denbora txikiagoan, fotolitografiarekin konparatuz. Bereizmenari dagokienez, bereizmena fotolitografian baino txikiagoa izan daiteke. Makinen kostua txikiagoa izan arren, ekoizpen prozesuan esku hartze handiago eskatzen du.

6.1.3 Konparaketa

Laburbilduz, fotolitografia aukera egokiena da, lortu nahi diren patroiak zehatzagoak lortzeko. Taulan aztertu diren parametroak azaltzen dira.

Aztertuko den faktore bakoitzak hurrengo pisua dauka ehunekotan: Produktibitatea: % 20, bereizmena % 60 eta kostua: % 20. Prozesu honetan, garrantzi handiagoa eman zaio bereizmenari. Tandem zeluletan egin nahi den ereduak zehaztasuna eskatzen baitu. Beste aldetik, produktibitatea eta kostua faktoreak aipatu dira. Industria munduan olata txanda handiak egiterakoan garrantzi gehiago hartzen dute.

Behin faktoreak definituta, bakoitza kalifikatu da. Puntuazioak egin dira.

Produktibitateari dagokienez, fotolitografian 4ko balioa eman zaio. Dokumentuan zehar ikusiko denez, emaitzarik onena lortzeko denbora eskaini behar zaion prozesua da. Gainera, olata bat baino gehiago egin nahi badira, produktibitatea txikiagoa da. Bereizmenari dagokienez puntuazioa maximoa hartzen du. Gaur egun, aurkitzen diren prozesuen artean da fotolitografia. Azkenik kostua aldetik, 6 balioa eman zaio.

Serigrafia aztertuta, produktibitatean puntuazioa altua dauka, denbora gutxian txanda asko egiten baititu. Bereizmenari dagokienez 4, zehaztasun faltagatik. Azkenik kostuak, 7 balioa dauka.

3. Taula. Fotolitografia eta serigrafia arteko konparaketa.

Prozesua	Produktibitatea (%20)	Bereizmena (%60)	Kostua (%20)	BH
Fotolitografia	4	10	6	8
Serigrafia	8	4	7	5.4

Faktore bakoitzari pisua eman eta prozesu bakoitzari puntuatu eta gero batura haztatua kalkulatu da. Behin emaitza ikusita, 3.taullan ageri dena, olatan marrakia egiteko fotolitografia aukeratu da.

6.2 Difusioa egiteko aukerak

Aurrerago ikusiko den bezala, olaten fabrikazioan difusioa puntu garrantzitsua da. Prozesu honen bitartez, siliziozko olatan fosforo (P) geruza bat gehitu nahi zaio. Hau lortzeko, laborategian bi aukera aurkitzen dira, batean difusioa serigrafia bitartez egiten da eta bestean fosforo labean. Hurrengo puntuetan bi aukeren azalpena emango da eta azkenik bi hauen konparaketa.

6.2.1 Difusioa serigrafia erabiliz

Difusioa serigrafia makinarekin egiteko pausu batzuk jarraitu behar dira. Lehenengo fosforozko pasta eroale bat prestatzen da. Nahasketa hau, serigrafia makina bitartez siliziozko olataren gainazalean kokatuko da. Pasta eman ondoren, olata lehortze-prozesu batetik igarotzen da, pastako disolbatzaileak kentzeko eta fosforoa silizioaren gainazalera egoki itsasten dela ziurtatzeko.

Serigrafia bitartez egiterakoan lortzen den emaitza kalitate altukoa izan daiteke baina kontuan hartu behar da hau lortzeko, makinak manipulazio ona eduki behar duela. Beraz, giza-errorea gertatzeko probabilitate handiagoa dago. Efizientziari dagokionez, arazo berdina gertatzen da, makinarekin lan egiten duen pertsonaren gaitasunaren menpe dago. Beraz, efizientzia altua izan daiteke baina arriskuak ditu. Azkenik makinaren kostua ez da oso altua. Gainera, behin makina erosita, energia aldetik ez dauka kostu gehigarririk labearen kasuan bezala. Aipatu beharrekoa da serigrafiak funtzionatzeko gehitu behar dela hasieran egiten den fosforo pasta eroalea eta nahasketa hau egiteko materialak ez direla merkeak.

6.2.2 Difusioa fosforo labea erabiliz

Difusioa egiteko beste aukera labearen erabilera da. Olatak labean sartzen dira temperatura altuen eraginpean. Prozesua burutzeko, lehenengo labea berotzen da. Behin berotuta dagoela fosforo atomoak labearen hodian zehar mugituko dira. Temperatura egokia lortzerakoan, siliziozko olatak labera sartzen dira. Momentu honetan, temperatura altuen ondorioz, fosforo atomoak zabaldu eta silizioaren gainazalean sartzen dira. Gainera temperatura altuak fosforoaren distribuzio uniformearekin ziurtatzen du. Amaitzeko, olatak labetik atera eta hozten dira.

Labearen metodoa erabilita, kalitate eta uniformetasun handia lortzen da. Difusioren kontrol zehatza egiteko aukera ematen du eta substratuaren gainazalean banaketa uniformearekin egiten da. Gainera azken emaitzak kalitate handiagoa dauka. Beraz, deposizioan efizientzia altua lortzen da. Abiaduraren aldetik aldiz, baxua izan daiteke labean denbora pasa behar delako emaitza ona lortzeko. Azkenik, kostua oso altua da. Alde batetik, labearen hasierako erosketaren kostua oso altua da, labea erosi eta instalatu behar da. Honi gehitu behar zaio erabiltzen den bitartean energia kontsumoa eskatzen duen makina dela.

6.2.3 Konparaketa

Bi prozesu mota hauek konparatzeko hurrengo faktoreak hartu dira kontuan: Kalitatea, efizientzia eta kostua. Faktore bakoitzari daukan pisua zehazteko ehuneko bat esleitu zaio. Kalitatea % 40, efizientzia % 40 eta kostua % 20. Tandem zelulak egiteko eta hauen karakterizazioa zehazteko beharrezkoa da emaitza fidagarria eta zehatza. Efizientziaren aldetik, garrantzitsua da labetik ateratzerakoan difusio ona lortzea karakterizazioa egiterakoan emaitzen interpretazioa ahalik eta hoberen egiteko. Azkenik kostua ere kontuan hartu beharreko faktorea da.

Batura haztatua lortzeko faktore bakoitzari puntuazio bat eman zaio. Serigrafiaren kasuan azkenengo emaitzan lortzen den kalitatea eta prozesua habian hartzeko efizientzia ikusita 4 eta 5 puntuazioa eman zaio, faktore hauek aztertuta ez baita emaitza hona lortzen. Kostuaren aldetik aldiz, labearekin konparatuta aukera hona da. Labearen aldetik, kostua izan arren, azkenean lortutako emaitzaren kalitatea eta hau lortzeko efizientzia aztertuta 8 eta 7 puntuazioa eman zaio.

4. Taula. Serigrafia eta labearen bitarteko difusioaren konparaketa.

Prozesua	Kalitatea (%40)	Efizientzia (%40)	Kostua (%20)	BH
Serigrafia difusioa	4	5	8	5.2
Labea difusioa	8	7	4	6.8

Taulan laburbildu egiten da difusioa egiteko aztertu diren bi prozesuen konparaketa. Faktore bakoitzari ezarri zaion puntuazioa eta BH balioa ikusita labearen bitartez egindako difusioa aukera egokia dela egiaztatzen da.

6.3 Mozketa egiteko aukerak

Fabrikazio prozesuetako batetan, olataren mozketa egin behar da, patroiz zehatz bat sortuz eta mozketa garbia lortuz. Hurrengo puntuetan mozketa gauzatzeko aztertu behar izan diren bi aukerak eztabaidatzen dira.

6.3.1 Laser bidezko mozketa

Laser bidezko mozketa, materialak ebaki edo grabatzeko prozesua da. Metodo honek, olata mozteko edo grabatzeko kontzentrazio handiko laser izpia erabiltzen du. Laser izpia sistema optiko baten bidez, orientatzen da olatan, non laserraren energia bero bihurtzen den. Bero honek materiala urtu, lurrundu edo erretzen du eta ebaki garbi eta zehatza sortzen du.

Laser mozketaaren produktibitatea aztertuz, mozketa abiadura handia eduki dezake. Olataren mozketa egiteko, laserra behin baino gehiagotan pasatu behar bada, itxaronaldia luzatu daiteke. Efizientziaren aldetik, energia materialera transferitzeko orduan oso eraginkorra da. Beraz hondakin gutxiago sortzen da eta ebaketaren kontrol zehatzagoa ematen du. Makinaren kostua: ebakitzailarekin konparatuta, hasieran makinak gastu handiagoa suposatzen du.

6.3.2 Ebakitzaila bidezko mozketa

Ebakitzailarekin olata mozteko, xafla bat edo ebaketa mekanikoko tresna bat erabiltzen da materialak ebakitzeko. Ebakitzailaren hortza materialean zehar mugitzen da mozketa burutzeko presioa aplikatuz zerra batetan bezala.

Ebakitzailearen produktibitatea aldakorra da egoeraren, materialaren eta ebakitzailearen arabera. Metodo honekin, olatan ertz irregularrak sor ditzake. Mozketak zehatzak egiteko aukera txarragoa da. Kostuen aldetik, makinaren erosketa, laserrarena baino merkeagoa da. Baina, konponketa kostuak handiagoak izan daitezke, hortzak higatu egiten direlako eta maiz aldatu behar direlako.

6.3.3 Konparaketa

Proiektuaren tandem olaten beharrak jakinda eta ebaketa egiteko aukerak aztertuta, laser bidezko mozketa egitea erabaki da. Hurrengo taulan agertzen da egindako konparaketa.

Konparaketa honetan faktore bakoitzari eman zaion pisua hurrengoa da: Produktibitatea % 20, efizientzia % 60 eta kostua % 20. Kasu honetan, efizientziak garrantzi handiagoa hartzen du. Mozketa ondoren lortutako emaitza zehatza eta segurua izan behar da, olataren apurketa ekiditeko eta gastu gehigarriak ez gehitzeko.

Puntuazioari dagokienez, produktibitateari dagokienez, nahiko antzekoak dira, biak desabantaila ezberdinekin. Efizientziari dagokienez, laser mozketak emaitza hobea lortzen du. Azkenik kostuaren puntuazioa erabakitzeke kontuan hartu da, laserrak ebakitzaileak baino aplikazio gehiago dituela eta honek makinaren kostua amortizatzen duela.

5. Taula. Laser mozketa eta ebakitzailearen arteko konparaketa.

Prozesua	Produktibitatea (%20)	Efizientzia (%60)	Kostua (%20)	BH
Laser mozketa	4	8	8	7.2
Ebakitzailea	4	5	5	4.8

Taulan, emandako azalpenen laburpena ikusten da. Kasu honetan BH balioa kalkulatu ondoren, mozketak egiteko laserra erabiltzea erabaki da.

7. Arriskuen analisisa

Atal honetan, proiektuak izan ditzakeen arriskuak azaltzen dira. Proiektu guztiek arrisku jakin batzuk dituzte eta funtsezkoa da arrisku hauek identifikatzea eta konponbidea zehaztea. Arriskuak identifikatu ondoren, hauek gertatzeko probabilitatea ebaluatu da, eta ondoren, taula batean aurkeztu dira. Azkenik, probabilitate-eragin matrizea azalduko da. Plan honen helburua arriskuen gertakizun-probabilitatea murriztea edo, gertatuz gero, aurre egiteko estrategiak ezartzea da.

7.1 Olataren apurketa

Proiekturako hainbat olata erabili behar dira, eta horiek oso hauskorra dira. Olataren apurketa proiektuaren etena eta kostu gehigarriak ekar ditzake. Gainera, olatak oso sentikorak dira kutsadurarekiko, eta kutsadura txiki batek ere neurketak oker bihur ditzake.

- Gertaera-probabilitatea: % 60
- Eragina: % 80
- Kontingentzia-neurriak: Olataren apurketa eta kutsadura ekiditeko, arreta handiz tratatu beharko dira, pintza berezi eta garbiak eta eskularruak erabiliz. Gainera, olatak babesteko material bereziak erabiliko dira. Laborategiko ingurumena kontrolpean egongo da, partikulen eta bestelako kutsatzaileen presentzia minimizatzen. Hala ere, haustura gertatzeko probabilitatea dela eta, olata gehigarriak izango ditugu beti eskuragarri.

7.2 Makinaren apurketa

Proiektu honetan erabilitako makinaria konplexua eta funtsezkoa da prozesuaren funtzionamendu egokia lortzeko. Makinaren apurketa proiektuaren geldialdia eta konponketa kostuak ekar ditzake. Gainera, makinak kutsatu daitezke, eta honek ere proiektuaren emaitzetan eragin kaltegarria izan dezake, nahiz eta hori gertatzeko probabilitatea txikia izan.

- Gertaera-probabilitatea: % 20
- Eragina: % 90
- Kontingentzia-neurriak: Arazo hau ekiditeko, makinak maiztasunez mantentzea ezinbestekoa da. Mantentze-lanen egutegi zorrotza ezarriko da, eta operadoreek prestakuntza egokia jasoko dute makinak behar bezala erabiltzeko. Gainera,

makinaren ordeko piezak eskuragarri izatea garrantzitsua da, konponketa azkarrak egiteko. Makinak kutsaduratik babesteko, laborategiko garbitasun estandarrek eta aire-iragazkiak erabiliko dira, eta makinak erabili aurretik eta ondoren garbituko dira.

7.3 Giza-akatsa

Giza akatsak prozesuaren fase guztietan gertatu daitezke, eta honek eragin kaltegarria izan dezake proiektuaren emaitzetan.

- Gertaera-probabilitatea: % 50
- Eragina: % 70
- Kontingentzia-neurriak: Giza akatsa murrizteko, langile guztiek prestakuntza egokia jasoko dute, eta prozedura estandarizatuak ezarriko dira. Gainera, segurtasun eta kalitate kontrol sistemak erabiliko dira, akatsak garaz detektatzeko eta zuzentzeko. Prozesu guztietan bi pertsonen arteko egiaztapenak egingo dira, akatsak murrizteko.

7.4 Probabilitate-eragin matrizea

Arrisku bakoitzaren azterketa eta kontingentzia plana egin ondoren, arriskuak konparatuko dira. Horretarako probabilitate matrizean, arrisku bakoitza baloratuko da, arrisku bakoitzaren larritasuna azkar identifikatzeko eta kudeatzeko. Taula koloretan antolatzen da, larritasun maila handia gorriz eta maila txikia berdez.

6. Taula. Probabilitate-eragin matrizea.

		Eragina				
		% 10	% 30	% 50	% 70	% 90
Probabilitatea	% 10					7.1
	% 30					7.2
	% 50				7.3	
	% 70					
	% 90					

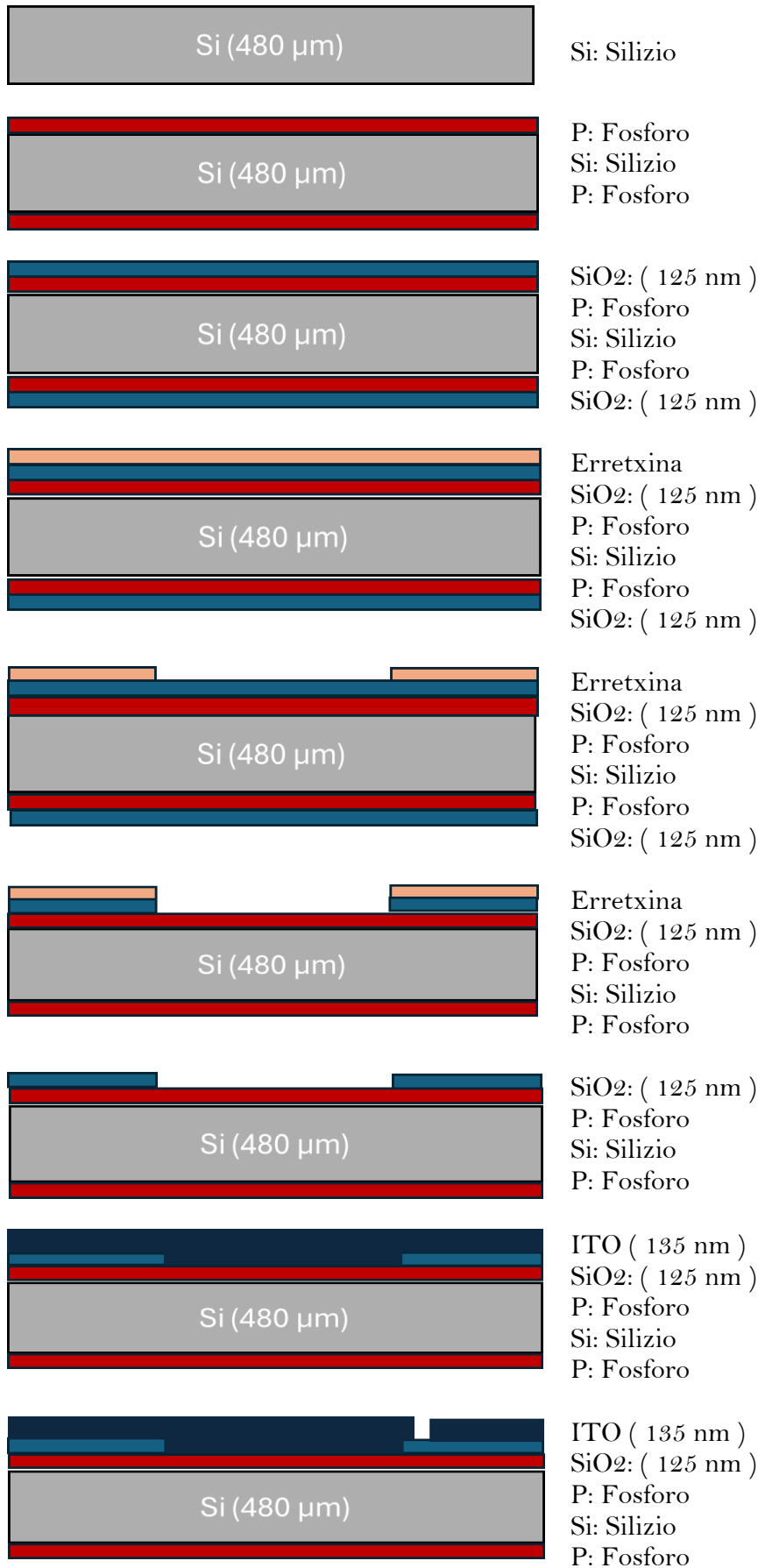
8. Proposatutako irtenbidearen deskribapena

Hurrengo atalean testuinguruan azaldutako erronka burutzeko irtenbidea azaltzen da. Hasierako azterketa egin ondoren, azkenengo emaitzan nahi diren geruzen konbinazioa erabaki da. Hau lortzeko prozesu ezberdinak gauzatu dira, gainera, prozesu hauen emaitza egokia aztertzeko, karakterizazio prozesu ezberdinak jarraitu dira. Puntu honetan lehenengo tandem zelularen geruzen eskema azaltzen da, geruza hauek kokatzeko erabili diren prozesuak eta karakterizazioa. Azkenik pausoz pauso laborategian egin diren urratsak erakusten dira. Behin emaitza lortuta, prozesu guztien ondoren ateratako ondorioa atera da.

Azkenengo emaitza lortzeko bi laborategien laguntza jaso da. Azalpenetan ikusiko den moduan, pausuen zehar, tandem zelula beste laborategi batzuetara bidali da. TiM laborategian egin ezin diren geruzak gehitzeko. Laborategian kokatutako geruzan tandem zelularen siliziozko zatiari dagokionak dira. Aurreko ataletan azaldu den moduan, tandem zelula silizioz eta perovskitaz osatuta dago. Bigarren zati hau, perovskita deposizioa hain zuzen ere, BCM laborategian egingo da.

8.1 Tandem zelulen geruzak

Hurrengo irudietan, hasieran aurkitzen den silizio olatatik abiatuta, azkenengo emaitza lortzeko beharrezkoak diren geruzak azaltzen dira. Alde batetik geruzen marrazkia ikusten da geruza bakoitzaren izenarekin. Bestean, geruza bakoitzak lortuko duen lodiera nanometrotan azalduta. Prozesuak gauzatzen diren bitartean, geruzak gehitzen edo moldatzen zaizkio zelulari. Siliziozko olaten geruza egin ondoren, perovskita gehitu eta gero lortzen den emaitzaren eskema azaltzen da ere hurrengo irudian.



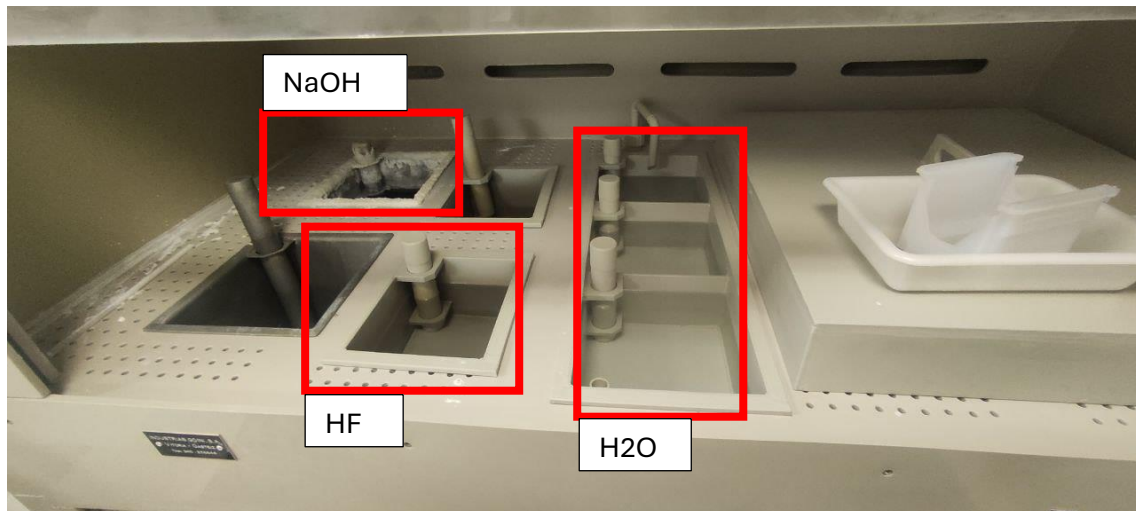
7. Irudia. Geruzen eskema.

8.2 Fabrikazio prozesuak

Prozesu osoaren zehar, prozesuak ulertzea eta makinaren erabilera ona ezagutzeko ezinbesteko da emaitza onuragarriak lortzeko.

8.2.1 Olataren garbiketa

Lehenengo pausoa tandem zelula egiteko, siliziozko olata garbitu behar da. Gehienetan, laborategira iristen diren olaten gainazala hondatua edo kontagiatuta etor daitezke. Alde batetik, kontaminazio metalikoa eduki dezake, bestetik, olio edo koipe orbanak egon daitezke gainazalean. Zikinkeria hau arazo larriak ekar ditzake hurrengo prozesuetan. Gainazalaren kontaminazioa garbitzeko, olata dekapatu eta leunketa egingo zaio sodio hidroxidozko (NaOH) eta fluorhidriko (HF) bainuen bitartez. Prozesu hau egiteko hurrengo irudian ikusten den erauzketa kanpaia erabiliko da.

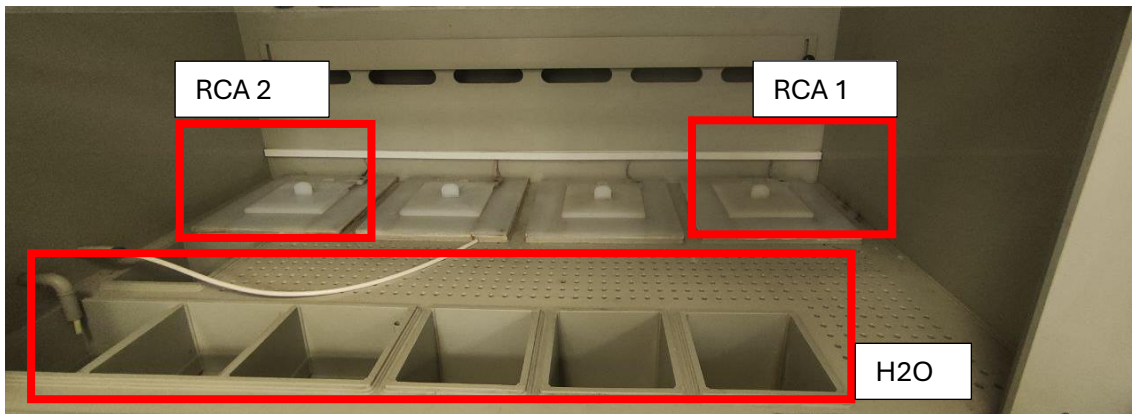


8. Irudia. HF, NaOH eta H₂O bainuak egiteko kanpaia.

RCA 1 eta RCA 2 (*Radio Corporation of America*) prozesuak egiteko irudian ikusten den beste kanpaia hau erabiltzen da. Aurreko kanpian bezala, ura (H₂O) bainuak aurrealdean ikusten dira eta atzealdean RCA.

RCA kupelak berotzeko, RCA likidoarekin zuzenean kontaktuan ez dagoen olio bat erabiltzen da. Olio hau, kupelaren hormetan sartuta dago, hau berotzen da eta hemendik RCA likidoari ematen dio beroa. Berotzeko teknika honi zeharkako olio-beroketa deritzo. Modu honetan, kontaminazioa ekiditen da eta ingurune garbi eta kontrolatu bat mantentzen da. Gainera, modu honetan, garbiketa prozesuaren tenperaturaren kontrol zehatzago bat egin daiteke. Bainu hauen likidoa berrerabili egiten da. Prozesuan zehar

ura lurruntzen denez, RCA egin baino lehen H_2O_2 gehitzen da, ur oxigenatua. Tenperaturaren kontrol ona egiteko, olatak bertan sartu egin behar da.

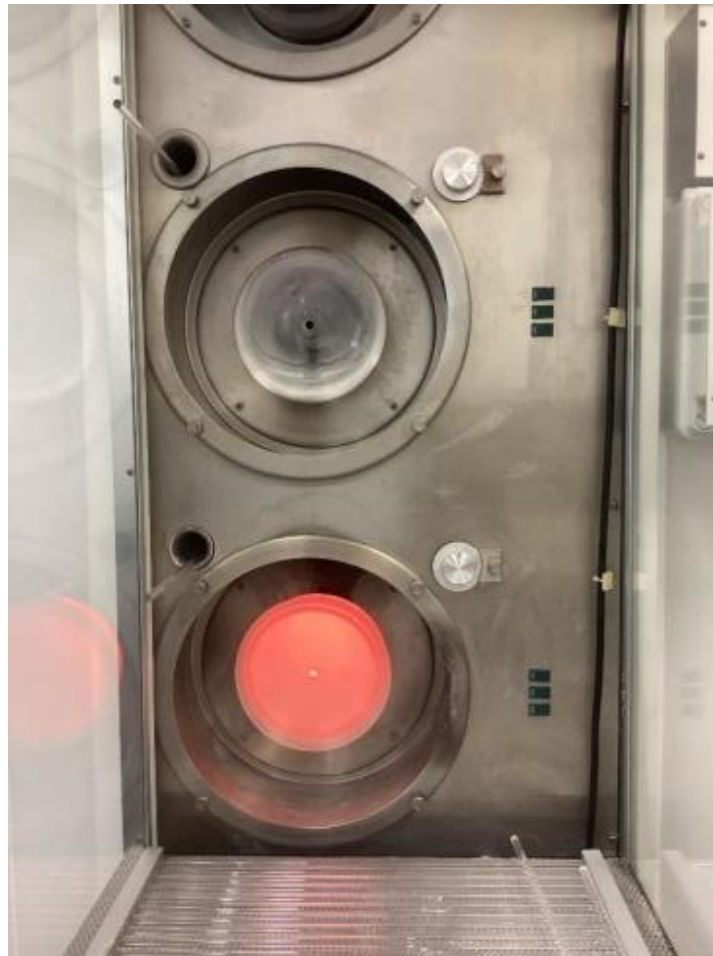


9. Irudia. RCA egiteko kanpaia.

- Dekapatu.
Oxido garbiketa egiteko, olatak azido fluorhidriko kupel batean sartzen dira. Dakartzan oxidoak kentzeko.
- RCA 1 eta RCA 2.
RCA 1: Lehenengo baino honetan kontaminazio organikoa kentzen da. Bainu honen konposaketa hurrengoa da: NH_3 , H_2O_2 eta H_2O .
RCA 2: Bigarren bainan kontaminazio metalikoa kentzen da. Bainu honen konposaketak hurrengoa da: HCL , H_2O_2 eta H_2O .

8.2.2 Difusioa eta oxidazioa

Prozesu ezberdinetan erabiltzen dira erdieroaleen ezaugarriak aldatzeko. Hauen helburua, Siliziozko olata garbi batean, silizio oxidozko (SiO_2) geruza dielektriko bat sortzea da. Hurrengo orriko irudian, prozesuan erabiliko den oxidazio-labea agertzen da. Hiru labe ikusten dira, bakoitzak gas ezberdin batekin difusio egiteko. Alde batetik, hodi batean oxidazioa egingo da. Beste hodian, fosforo dopaketa.



10. Irudia. Oxidazio labea.

Fosforo labean, gas honen dopaketa egiten da. Fosforo atomoak Si olatarekin kontaktuan jartzean, atomoak siliziozko sare kristalinoan sartzen dira. Konbinazio honen ondoren atomo bakoitzeko, elektroia bat geratzen da. Karga negatibozko olata bat lortuz, n motakoa. Fosforoz dopatutako olatak konduktibitate elektriko altuagoa dauka, karga eramaile gehiago daudelako korrante elektrikoa eramateko.

Fosforo difusioa eta gero, oxidazioa egiten da. SiO_2 geruza bat sortzen du. Helburu ezberdinak eskaintzen ditu. Isolatzaile elektrikoa da. Barrera isolatzaile bat sortzen du olataren eta kanpoko ingurunearen artean, modu honetan, zirkuitu laburrak ekiditen ditu. Baita, kanpo kontaminazio aurkako babesa ematen du [17].

Oxidazioaren barruan bi oxidazio mota erabiltzen dira, oxidazio lehorra eta oxidazio hezea:

- Oxidazio lehorra: Oxidazio lehorrean, olata gas ingurune kontrolatu batean kokatzen da tenperatura altuen eraginpean. Prozesu-honetan oxigeno-atomoek gainazaleko silizioarekin erreakzionatzen dute geruza fin bat sortuz.

- Oxidazio hezea: Oxidazio hezearen kasuan, olata ur lurrunaren eraginpean dago. Ur lurruneko oxigeno atomoek silizioarekin erreakzionatzen dute, SiO₂-ko geruza bat osatuz. Kasu honetan, ur lurrunaren eraginpean egoteak oxidazio lehorrekin alderatuta oxido geruza lodiagoa izan daiteke.

Oxidazioaren hazkundearen proportzioaren kalkulua

Oxidazio prozesua egin ondoren lortzen den oxidazio-lodierak informazio erabilgarria ematen dute oxidazio-prozesuaren etapa bakoitzean metatutako oxido-geruzen kalitateari eta uniformetasunari buruz.

Behealdeko formuletan agertzen diren koefizienteek, oxido-geruzaren hazkunde-abiaduraren (B) eta substratuan ioiak daukaten difusio abiaduraren (A) arteko erlazioa adierazten dute. B/A erlazioa funtsezkoa da oxidazio-geruza nola hazten den zehazteko [18].

- Oxidazio hezea:

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{wet} = (9.70 \times 10^7 \frac{\mu m}{h}) \exp\left(-\frac{2.05 eV}{kT}\right) \quad (3)$$

$$(B)_{wet} = (386 \frac{\mu m^2}{h}) \exp\left(-\frac{0.78 eV}{kT}\right) \quad (4)$$

- Oxidazio lehorra:

$$\left(\frac{B}{A}\right)_{dry} = (3.71 \times 10^6 \frac{\mu m}{h}) \exp\left(-\frac{2 eV}{kT}\right) \quad (5)$$

$$(B)_{dry} = (772 \frac{\mu m^2}{h}) \exp\left(-\frac{1.23 eV}{kT}\right) \quad (6)$$

Kalkulatutako koefiziente hauek oxidoaren hazkunde-ekuazioan aplikatzen dira.

$$tox = \frac{B}{2\left(\frac{B}{A}\right)} \sqrt{1 + \frac{4\left(\frac{B}{A}\right)^2}{B} t} - 1 \quad (7)$$

Tox prozesua egin ondoren lortutako oxido-geruzaren lodiera adierazten du eta t, oxidazio denbora totala.

Lortu nahi den oxidazio geruzaren arabera, t parametroaren kalkulua egiten da. Eranskinetan agertzen den SiO₂ *Color Chart* erabiltzen da lodiera aztertzeko, non kolore bakoitza lodiera bati dagokio.

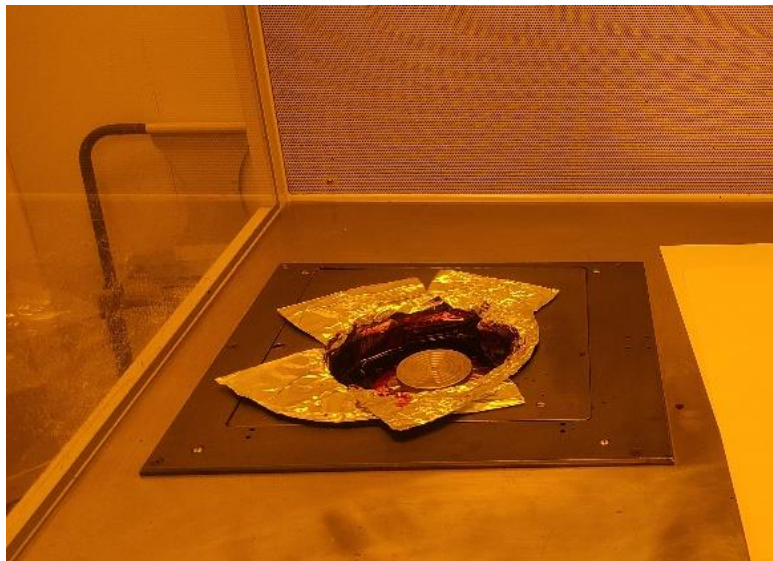
8.2.3 Fotolitografia

Industria-mailan erdieroaleen fabrikazioan fotolitografia botila-lepoa da. Hau da, prozesu guztiak batuta, fotolitografia denbora gehien eskatzen duen prozesua da. Atal honen kalitatea substratuaren menpe dago, aurreko prozesuak ondo egiteak garrantzi handia dauka. Fotolitografian hiru etapa nagusi bereiz daitezke [19] [20].

1. Foto erretxinazko geruza baten eraketa olata gainean.
2. Irudi baten transferentzia, maskara baten bitartez.
3. Irudiaren eraketa substratuaren gainean.

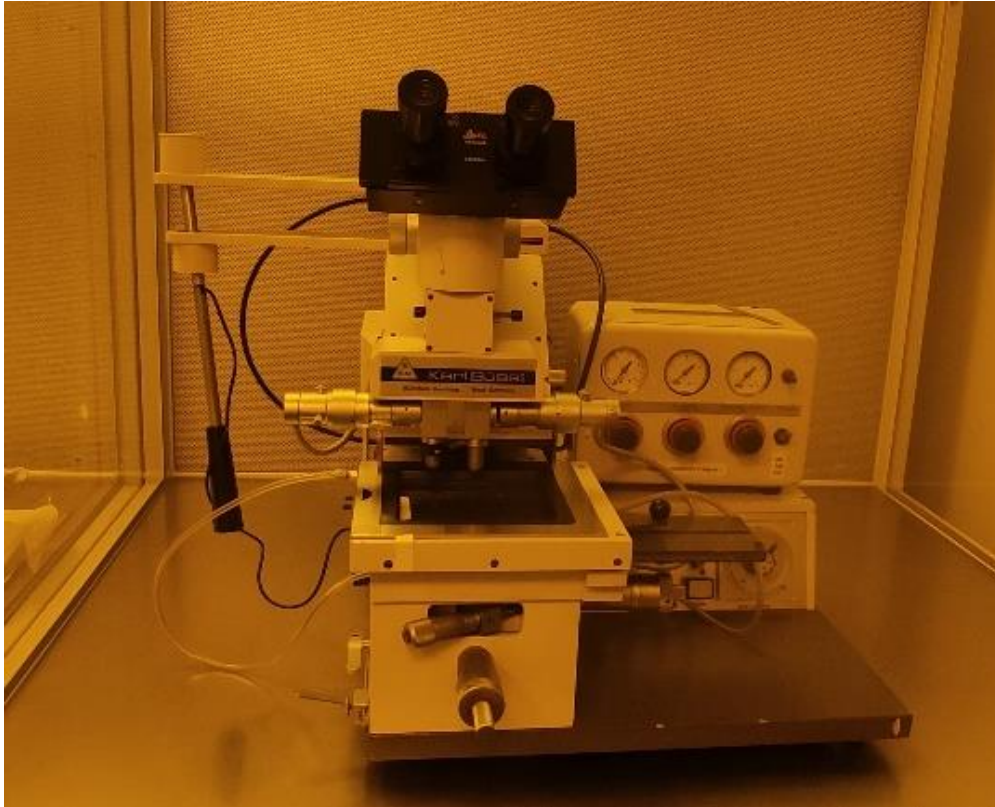
Fotolitografia prozesua egiteko, kontuan hartu behar da material fotosentikorrarekin lan egiten dela. Beraz, fotolitografia gelako argia iragazi egin behar da, non argia iragazita dagoen eta UV izpiak baino ez ditu pasatzen usten.

Irudietan, fotolitografia-prozesuaren funtsezko bi makina ageri dira. Lehenengo irudian, spinerra ikusten da; gailu honi esker erretxina fotosentikorezko geruza modu uniformearen aplikatzen da.



11. Irudia. Fotolitografia gelako spinerra.

Bigarren irudia, argi esposizio makina da. Lehenago aipatutako maskara kokatzeko eta olatari argia emateko modu kontrolatu batean erabiltzen da.



12. Irudia. Argi esposiziorako gailua.

Erretxinak argiaren eraginpean aldaketak jasaten ditu, fotosentikorra baita. Argiarekin degradatu daiteke edo sendoagoa egin eta erresistentzia hartu. Kasu honetan erabiltzen den erretxina argiaren eraginpean degradatu egiten da. Spinerean erretxina kokatu ondoren, irudian ikusten den labean sartzen da ondo lehortzeko.



13. Irudia. Erretxina lehertzeko labea.

Olatan irudiaren transmisioa hiru zatitan egin daiteke. Lehenengo bi etapak bigarren makinan egiten da, maskara kokatu eta esposizioa egiten da. Argiaren eraginpean egon den erretxina degradatuko da. Azkenengo zatia erretxina errebelatzea da. Errebelazio prozesua, agerian egon den erretxina eremua ezabatzea da (erretxina positiboa) edo agerian egon ez den erretxina kentzea (erretxina negatiboa). Prozesuaren irizpide garrantzitsuenetariko bat errebelatzailearen kontzentrazioa da. Efizientzia bermatzeko errebelatzailearen kontzentrazio minimoa behar da. Beste irizpide garrantzitsua: esposizio denbora gero eta handiagoa orduan eta errebelazio denbora txikiagoa. Parametro hauek kontuan hartuta erabakitzen da esposizio denbora eta erretxina bainuren denbora.

Prozesua amaitzeko, erretxina barik geratu den zatien oxidazioa kentzen da bainu ezberdinak eginez. Pauso hau olataren garbiketa egin den gelan burutzen da, teknika berdinak erabiliz. Azkenik azetona erabiliz gainerako erretxina kentzen da.

Gaur egun, fotolitografia mikroelektronikaren garapenaren oinarritzko ardatzetako bat da. Prozesu fotolitografiakoak erabakitzen du tamaina txiki eta zehatza duten gailu erdieroaleak lortzeko aukera.

8.2.4 ITO geruza

ITO (Indium Tin Oxide) tandem zeluletan geruzen arteko interfaze moduan kokatzen da. ITO geruza erdieroalea eta gardena izan behar da [21] [22].

ITO geruzak perovskita eta silizio artean elektroien transferentzia eraginkorra bermatzen du. Fotoiaren energiaren eraginetik lortutako elektroihutsu parearen kontaktu elektrikoetara mugitzeko eta Si -ri dagokion fotoiak xurgatzeko bidea ematen du. Honez gain, gardena izan behar da argia ez galtzeko eta fotoien xurgatzea modu efiziente batean egiteko.

Geruzaren lodiera efizientzia optimoa lortzeko beste parametro garrantzitsu bat da. Gaitasun eroalea eta gardentasunaren arteko oreka lortu behar da. Lodiera handiegia izanez gero, eroalea izango litzateke baina gardentasun parametroa okerragoa da.

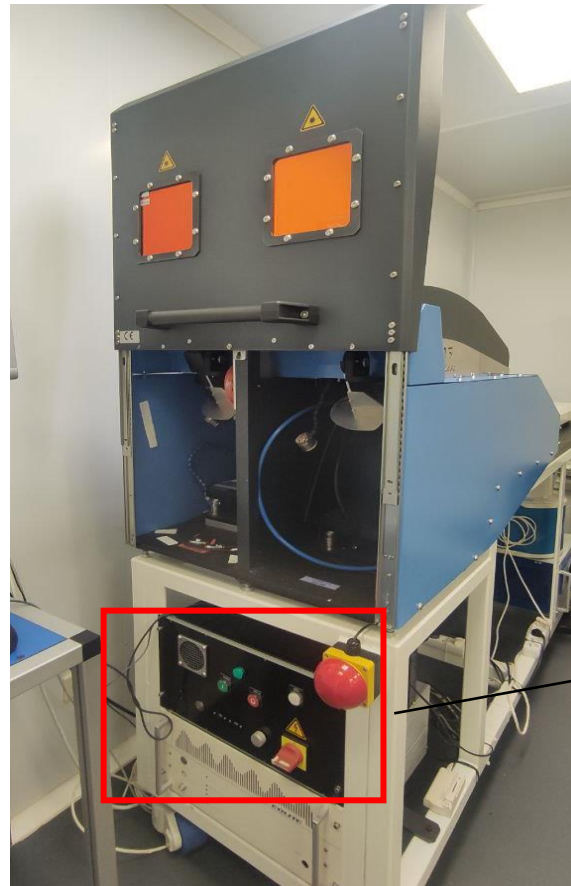
8.2.5 Laser isolamendua eta mozketa

Tandem zelula mozteko erabili den makina laserra da. Laserraren bitartez olataren mozketa eta isolamendua egin da. Irudian makinaren atal ezberdinak bereiz daitezke. Mozketa bi laseren bitartez egiteko aukera ematen du. Alde batetik IR izpia eta bestetik GR.

IR infragorrien laserrari dagokio, GR laserrarekin konparatuta uhin luzera luzeagoa du. Uhin luzera handiago denez sakonago sar daiteke materialean, eta eraginkorragoa izan daiteke ebaketa mota batzuetarako. Hala ere, laser mota honek bero handiago sortzen du eta olata hondatzeko arriskua handiagoa da.

GR laserrak uhin luzera laburragoa du, eta ebakitzen den materialari kalte txikiagoa eragiten dio. Uhin luzera txikiagoa denez, gainazalak xurgatzen du eta ebaki zehatzagoa eta garbiagoa izan daiteke, olatari kalte termiko txikiagoa eginez.

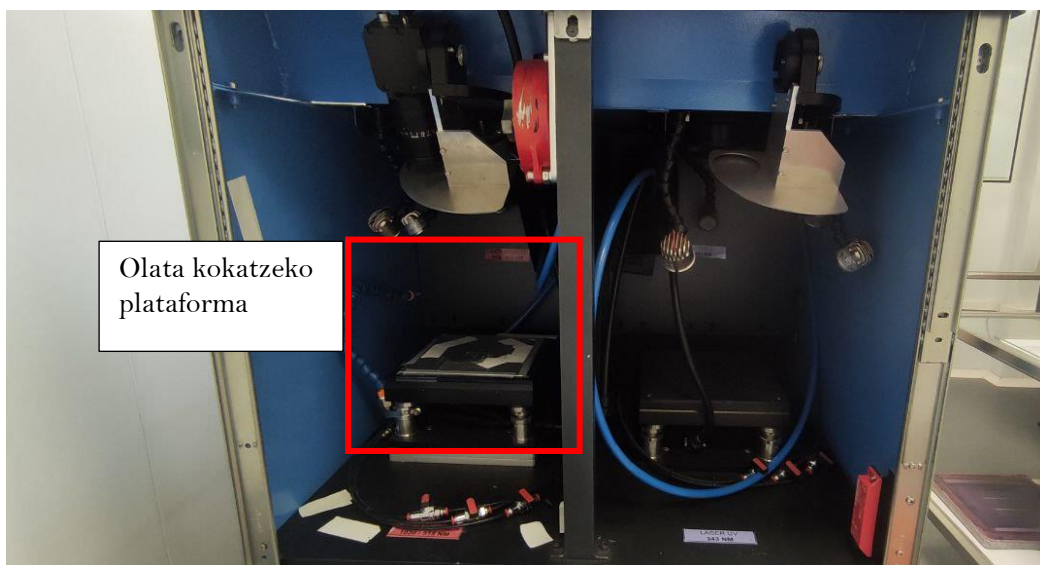
Laser makina ordenagailu batera konektatuta dago. Hemen mozketa ezberdinen arabera edo isolamendua egin behar bada, parametroak aldatzen dira. Irudietan ikus daitezkeenez, olata laserraren barrualdean kokatzen da, markatuta dagoen lekuan. Behealdean laser motaren aukeraketa, makina piztea eta ordenagailuaren kontrola aurkitzen dira.



Laser kontrola

14. Irudia. IR/GR laserra.

Olata, hurrengo irudian ikusten den plataforman kokatzen da. Arreta handiz kokatu behar da gida marken arabera behar bezala lerrokatuta egoteko, mozketa egokia egiteko ziurtatzeko.



Olata kokatzeko
plataforma

15. Irudia. Laserraren barrualdea.

Laser teknologiak mozketa eta isolamendu zehatza egiteko aukera ematen du, funtsezkoa olatan gelaxkak egiteko. Malgutasun aldetik, ordenagailuan dagoen softwarea erabiliz, erabaki ahal da mozketaaren patroia eta zehaztasunez burutu, parametroen aldaketak eginez material ezberdinen mozketa gauzatu daiteke baita hauen isolamendua. Aldatu ahal diren parametro batzuk, besteak beste, laserraren potentzia, abiadura edo ibilbidea dira. Parametro hauen doiketak software baten bitartez egiten direnez, prozesua automatizatu daiteke eredu zehatza mantentzeko.

8.3 Karakterizazioa prozesuak

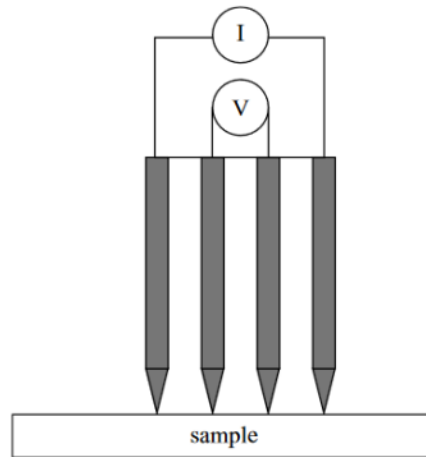
Prozesu bakoitzaren efizientzia eta emaitza aztertzeko karakterizazio prozesu batzuk burutu dira. Atal honetan karakterizazioa egiteko eta emaitzak interpretatzeko beharrezkoak diren kontzeptuak azaltzen dira. Fabrikazioaren zehar lau karakterizazio burutu dira. Serie erresistentziaren neurketa, bizitza-denbora, elipsometroarekin geruzaren neurketa eta azkenik mikroskopioarekin azterketa.

8.3.1 Geruza erresistentziaren neurketa

Olata fin baten geruza erresistentziaren neurketa egiteko, lau puntako zunda neurtzailea erabiltzen da (4PP). Teknologia hau garatuz joan da eta erdieroaleen industrietara asko erabiltzen den metodologia teknika batera iritsi da. Geruza erresistentziaren datuak (R_s) erraz erlazioa daitezke geruzaren lodierarekin (t) eta erresistibitatearekin (ρ) hurrengo formularen bitartez [23].

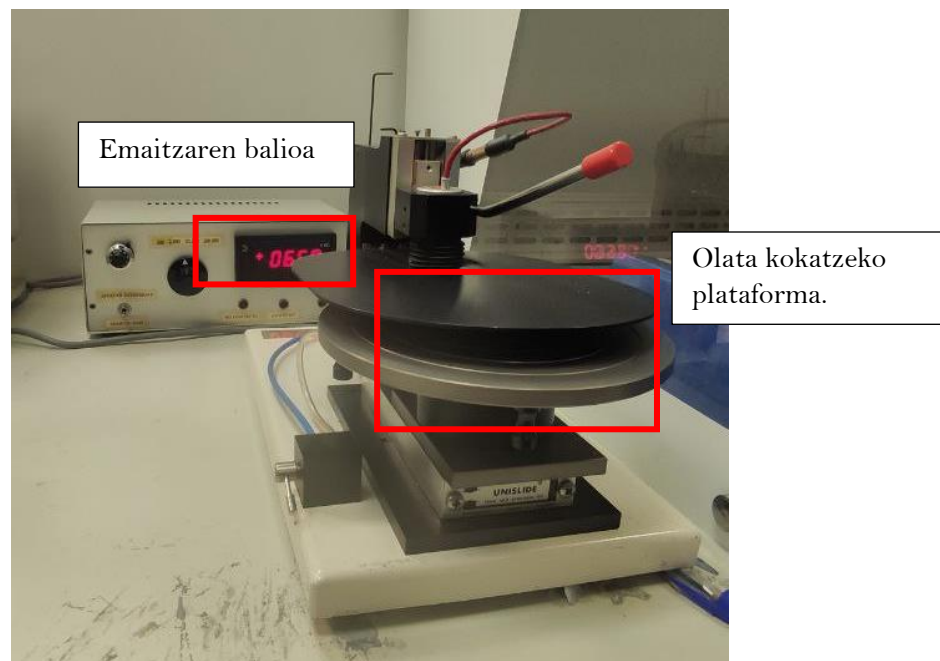
$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (8)$$

Lau puntako neurgailuak geruzen erresistibitateri, lodierari eta uniformetasunari buruzko datuak ematen ditu. Gainera, lau puntako neurgailuarekin, erresistentzia parasitoak gailutik kentzen dira eta honela, zehaztasun handiagoko neurria lortzen da.



16. Irudia. Lau puntako neurgailua.

Lau puntako neurgailua erabili nahi bagenu bus metalizatu berri baten linea erresistentzia neurtzeko, nahiko litzateke neurtu nahi den eremura apuntatzea eta tresnaren punta eremu horren gainean jartzea. Une honetan, gailuak egindako neurketaren balioa erakutsiko digu automatikoki. Irudian ikus daiteke laborategian erabili den makina.



17. Irudia. 4 puntako makina. Serie erresistentzia neurketa egiteko.

Makina hau erabiltzearen abantailei dagokienez, erabilera erraztasuna eta egindako neurrien bereizmena eta kalitate handia nabarmentzen da. Metodo honen bidez olataren erresistibitatearen neurketa zehatza egin daiteke, hau funtsezkoa da, zelulen karakterizazioan. Beste aldetik, kontuan hartu behar da metodo honek ekar ditzakeen

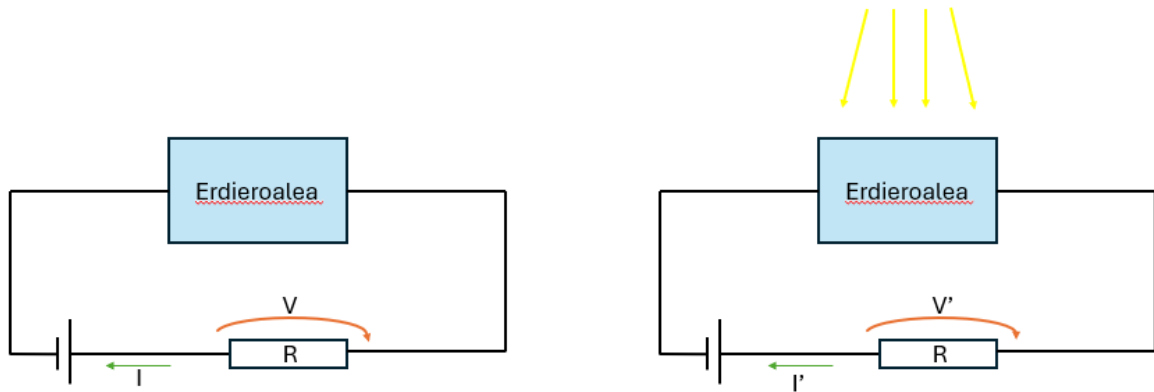
desabantailak. Puntu jakin baten erresistentzia neurtzeko eraginkorra den arren, haren erabilgarritasuna murriztu egiten da olata orokorraren erresistibitatearen neurketa egin nahi denean, neurri asko hartu behar baitira, jatorrizko neurketatik desbideratu daitezkeenak eta honen fidagarritasuna murriztu. Gainera, metodo honek olata kaltetu dezake; izan ere, metala neurtzeak puntekin sakatzean, materiala aldatu eta higatzeko arriskua dakar eta beraz, funtsezkoa da neurriak kontu handiz hartzea. Beste erronka bat puntu berean behin eta berriz apuntatu eta neurtzeko zailtasuna da. Horrek neurketa prozesua zaildu eta lortutako emaitzen zehaztasunari eragin diezaioke.

8.3.2 Bizitza-denbora

Bizitza-denbora neurtzeko, fotokonduktantziaren erorketaren teknika erabiltzen da. Fotoeroale batek argia xurgatzen duenean, elektroio libreen eta hutsuneen kopurua handitu egiten da, eta horrek eroankortasun elektriko handiagoa eragiten du.

SiO₂-ko geruza duten eguzki zelula guztietan, bizitza-denbora eraginkorra neurtu da. Parametro honi esker, erdieroalearen efizientzia neurtzen da, bizitza-denbora handiagoa duten olatek, efizientzia handiagoa dutela esan nahi du eta probabilitate handiagoa korrante elektrikoa sortzeko. Ikerkuntza arloan, parametro hau olataren material egokiak aukeratzera laguntzen du. Materialaren arabera, bizitza-denbora handiagoa izan dezake. Gainera, aurreko prozesuen eraginkortasuna neurtzeko metodoa da.

Elektroiak kitzikatzeko, erdieroaleak argiaren eraginpean egon behar da. Argi honek energia minimo bat izan behar du elektroioak balentzia bandatik kondukzio bandara aldatzeko. Bizitza-denbora neurtzeko, irudian ikusten den zirkuitua erabiltzen da. Erdieroaleari polarizazio tentsio bat eta serieko karga erresistentzia bat aplikatzen zaio. Erdieroalea argiaren menpe dagoenean serieko erresistentzia tentsio aldaketa bat sumatuko da. Aldaketa honen desberdintasunarekin erdieroalearen bizitza-denbora neurtzen da [24].



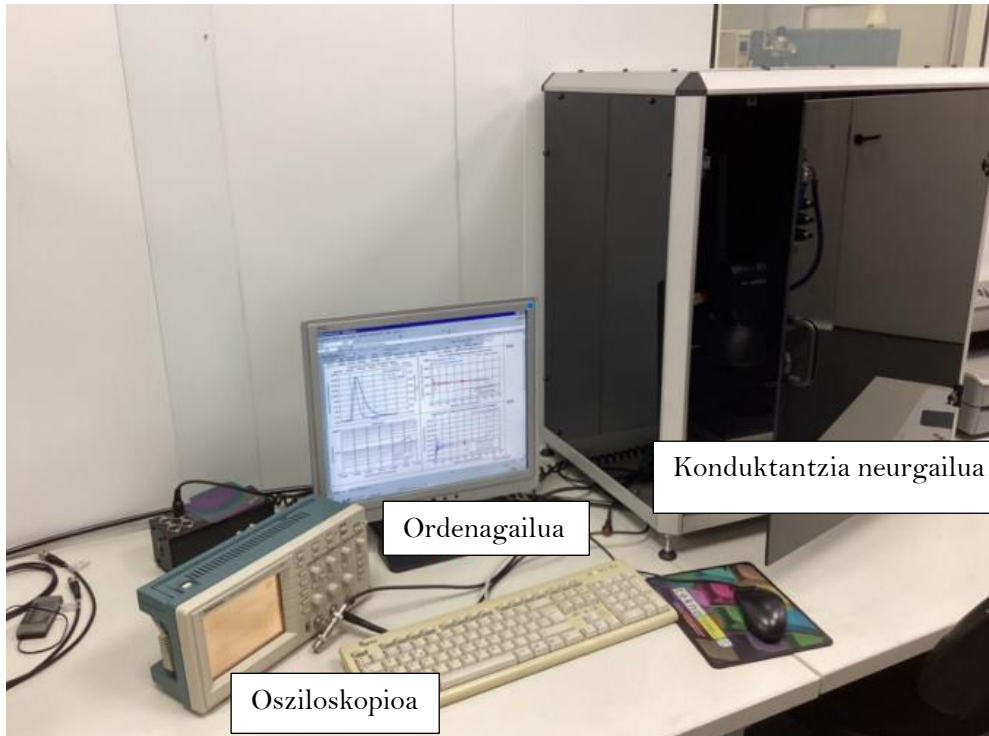
18. Irudia. Bizitza-denbora neurteta zirkuitua.

Irudian ikusten den moduan, argiaren eragina gehitzean erresistentziaren tentsioan aldaketa gertatzen da. V eta V' ren arteko aldaketa neurtzen lortzen da bizitza-denbora. Aldaketa gero eta handiagoa orduan eta denbora bizitza handiagoa.

Birkonbinazio tasak erdieroalearen bizitza-denbora zehazten du, eta materialean dagoen gutxiengo eramaileen kontzentrazioan eragina du. Gutxiengo eramaileen kontzentrazioa zenbat eta handiagoa izan, orduan eta handiagoa izango da birkonbinazio tasa eta beraz, laburragoa erdieroalearen bizi-denbora.

Argiaren kitzikapena gertatzen den bitartean, gutxiengo eramailek sortzen den korrante elektrikoari laguntzen diote. Birkonbinatu aurretik, eramaile hauek kondukzio bandan egon daitezkeen denbora, neurtzen den bizi-denbora da.

Hurrengo argazkian ikusten da bizitza-denbora neurtzeko erabilitako makina eta haren osagaiak.



19. Irudia. Bizitza-denbora neurtzeko makina.

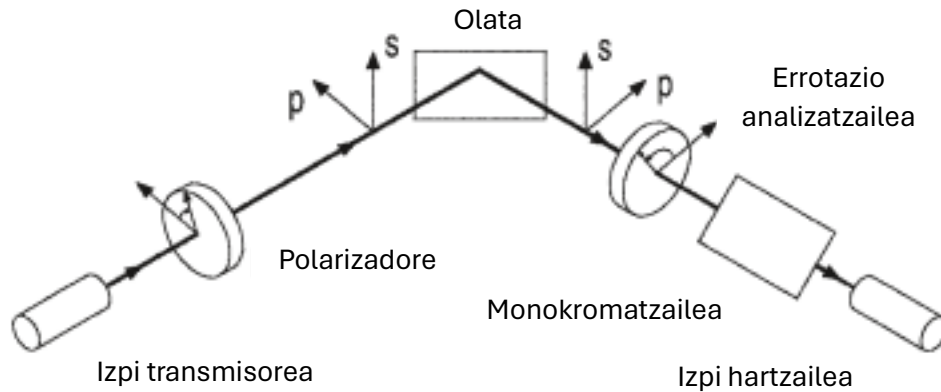
Osziloskopiaok konduktantzia eta argiztapen datuak antzematen ditu, eta ordenagailuak osziloskopioaren konfigurazioa kontrolatzen du, osziloskopioarekin neurtutako datuak irakurtzen ditu eta neurketak Matlab-ekin doitzen ditu. Ordenagailuan, teffsim programa dago instalatuta, eta lortutako neurketak doitu eta τ balioak kalkulatu ditu. Olatu konduktantzia neurgailuaren erdian jartzen da eta han *flash* bat jaurtitzen da eta zelularen bizitza kalkulatu da.

8.3.3 Elipsometroa

Elipsometroa eguzki-zelulen karakterizazio optikoko teknika bat da, material erdiekoaleen geruza meheen propietate optikoak neurtzeko. Teknika honek errefrakzio indizeari eta geruzaren lodierari buruzko informazioa eskaintzen du. Eguzki-zelulak fabrikatzen diren bitartean, material erdiekoaleen geruza meheak metatzen dira, zelularen egitura desberdinak eratzeko. Elipsometroa deposizio-prozesua kontrolatzeko erabiltzen da, sortutako geruzen uniformetasuna eta kalitatea bermatuz.

Argiak materiala jotzen duenean, izpiaren polarizazioaren aldaketa gertatzen da. Honen bitartez, materialaren neurketa egiteko gai da. Irudian elipsometroaren eskema ikus daiteke bai eta haien osagaiak ere. Bi ataletan banatzen da, izpiaren transmisioa eta izpiaren jasotzea. Alde batetik argi transmisioa aurkitzen da eta olatara heldu baino lehen, izpia polarizatu behar da. Polarizazio hau ezaguna eta doigarria da. Beste aldetik,

hartzailearen atala aurkitzen da, izpia aztertzeko. Olatak islatutako argiaren polarizazio egoera neurtzeko osagai optikoak kokatu dira. Lehenengo polarizazioaren errotazio aldaketa neurtzeko gailua, polarizazio eliptikoaren parametroak zehazten ditu. Bigarren gailua monokromatzailea, uhin-luzeraren arabera, argiaren konposizioa neurtzen du.

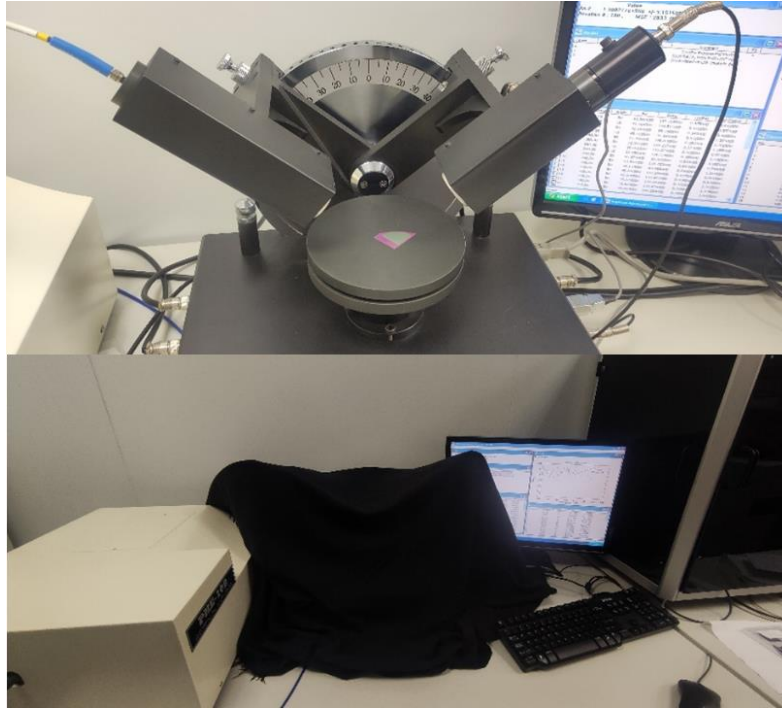


20. Irudia. Elipsometroaren eskema.

Elipsometroaren neurketak egiteko, neurketa dispersio modelo ezberdinak aurkitzen dira. Material dielektrikotarako eta absortzio gutxi daukaten materialetan Cauchy metodoa erabiltzea egokiena da.

Hurrengo irudian ikusten den bezala, neurketa egiteko, olata elipsometroaren erdian kokatzen da. Ondoren, manta batez estaltzen da olata, erabateko iluntasuna egon dadin, beharrezkoa baita neurri neurria modu zehatz batean egiteko. Argi polarizatuek olata seinatzen dute, neurketa egiten dute eta ordenagailuan gordetzen da.

Neurtutako datuak aztertzeko, ordenagailuan bi programa daude. Batak, neurketarako softwarea eta besteak, neurtutako datu horiek aztertzeko softwarea. Neurketa-softwareari esker, neurri-angelua doitu daiteke, hau da, kontrol kutxa editatu daiteke. Neurriak zein balioaren artean hartu nahi diren eta zenbatetan behin hartu nahi diren zehaztu daiteke.



21. Irudia. Elipsometroa.

Cauchy-ren metodoa erabiltzen da errefrakzio-indizea zehazteko. Errefrakzio-indizearen eta argi intzidentearen uhin-luzeraren arteko erlazioa Cauchy-ren formularen bidez deskribatzen da.

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (9)$$

$$k(\lambda) = \alpha e^{\beta(12400(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\gamma}))} \quad (10)$$

Aurkitzen diren parametroen artean, uhin-luzera aurkitzen da. Kasu honetan, uhin-luzera oso baxua denez B eta C terminoak baztertu egiten dira eta honako adierazpen honekin gelditu gaitezke:

$$n(\lambda) = A_n \quad (11)$$

Neurketak bildu ondoren, errefrakzio indizea eta metatutako geruzaren lodieraren analisia egiteko unea da. Lehenik eta behin, lortutako datuak kargatzen dira, eta substratuaren ezaugarriak hautatzen dira. Hauek lehenengo geruzari dagozkio. Ondoren, bigarren geruzari dagokion materiala hautatu daiteke edo Cauchy eredua. Cauchy metodoak, datuak iteratuko ditu material mota edozein dela ere.

8.3.4 I-V kurbaren neurketa.

Funtzionatzen dagoen gailu fotovoltaiko baten tentsioa eta korrante-intentsitatea I-V kurbatik lortzen dira. Kurba hau argiztapenaren bidez erregistratzen da eguzki simulatzaile baten bidez, AM 1.5G erradiazio erasotzailearen espektro-banaketa sortzen, tenperatura kontrolatu batekin. Argiaren intentsitatea 1 *sun* ekoa da (100 mW/cm^2).

Neurketak egiteko metalezko maskara bat erabiltzen da. Modu honetan argi dispertsioa ekiditen da neurketak ahalik eta errealena lortzeko. Ereku aktiboa, zelularen azalerari, azalera metalizatua kentzean lortzen den eremua da.

I-V kurbatik abiatuta zelularen karakterizazio balioak lor daitezke:

Voc: Zirkuitu irekiko tentsioa. Gailua zirkuitu irekiko egoeran dagoenean erregistratzen den gehieneko tentsioa.

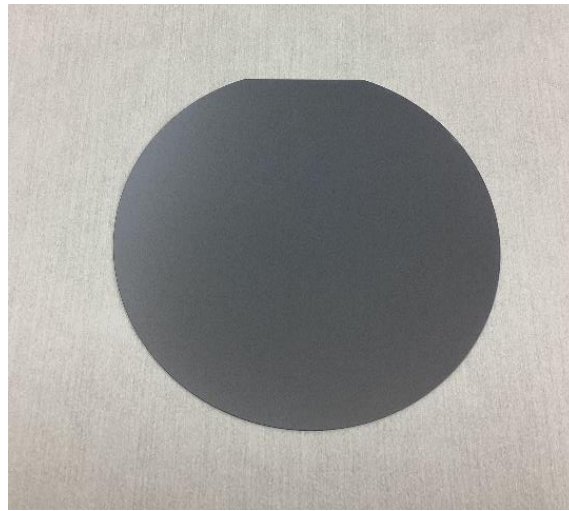
Isc: Korrontea zirkuitu laburrean. Zirkuitu itxiko baldintzetan gailuan sortzen den korrante-balio maximoak zehazten du. Balio hau perovskitaren xurgapenaren eta elektroi-hutsune pareek birkonbinatu baino lehen kontaktura heltzeko duten gaitasunaren menpe dago.

Parametro hauekin zelula baten konbertsioa efizientzia neurtzen da.

9. Lortutako emaitzak

Lehen azaldutako makinen erabilera eta funtzionamendua ikusita, atal honetan pausoz pauso jarraitu diren jarraibideak azalduko dira, baita, prozesu bakoitzaren ondoren lortu diren emaitzak. Kontuan hartu behar da, makinen azterketa egin ondoren tandem zelula ezberdinen fabrikazioa egin dela. Nahiz eta prozesuak ondo aztertu eta ezagutu, tandem zelulen hainbat txanda egin behar izan dira azken emaitza ahalik eta zehatzena izan dadin. Hurrengo atalean azken zelula multzoaren emaitzak jaso dira. Metodo hau jarraitzeari esker, hobeto ulertu ahal izan dira prozesu guztiak, emaitza bakoitza karakterizatzeko eta ondorioak ateratzeko orduan.

Hasiera batean p motako siliziozko olata hartu da oinarri moduan. Alde batetik, zelularen oinarrizko geruzaren erresistentzia elektrikoa murrizten du, tentsio galerak minimizatzen eta Tandem zelularen eraginkortasun elektrikoa hobetzen. Beste aldetik, p motako geruzak egonkortasun kimikoa eta iraunkortasun mekanikoa eman dezake. Beraz, bizitza-denbora eta epe luzeko efizientzia hobetzen laguntzen du.



22. Irudia. Siliziozko olata.

9.1 Olaten garbiketa

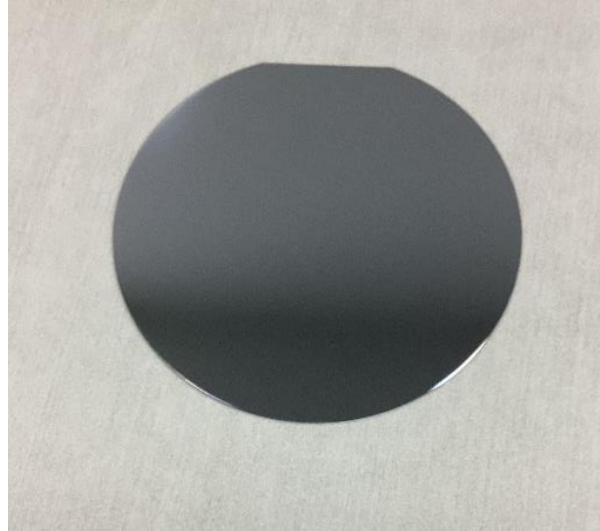
Garbiketa egiteko, 8.2.1 puntuan azaldu diren makinetan burutu da. Jarraitu diren pausoak modu eskematiko batean azalduko dira. Pauso hauek egin ondoren, olatak berez dakarren oxidazioa kenduko da eta olata distiratsuagoa ikusiko da, baita nola ura materialetik irristatuko den ere ikusiko da, oxido arrasto guzti guztiak kendu direnaren seinale.

1. Ura: Garbiketa hasi aurretik, olataren hasierako bainua egin behar da urez betetako ontzian.
2. NaOH: Bigarren urratsean, NaOH ontzian sartzen da olata.
3. Ura: NaOH eta HF ezin direnez zuzenean nahastu, NaOH-ko bainuaren ondoren urarekin garbitu behar da hurrengo ontzira pasatu baino lehen.
4. HF: Ondoren, HF ontzian sartu behar da olata, dagokion bainua egiteko.
5. Ura: Azkenik, olata erabat garbitzen dela ziurtatzeko, azken bainua uretan egiten da.

Garbiketa RCA prozesuaren bidez egiteko, ur oxigenatua gehitu behar zaio bainuari, garbiketa prozesua hasi bainu bost minutu lehenago. Hurrengo urratsak jarraitu dira:

1. H₂O₂ gehitzea RCA-ko bi ontzietan: hasi aurretik, ur oxigenatua gehitzen zaio RCA-ko bi ontzietara.
2. 5 minutuko itxaronaldia: Bost minutuko itxaronaldia kupeletako tenperaturan beroketa uniformea lortzeko.
3. Bainua RCA-n: Olata RCA-ren lehenengo ontzian sartzen da lehen garbiketa-bainua egiteko.
4. Ur bainua: RCA1-ean bainua egin ondoren, olata urez betetako ontzi batean sartzen da,
5. RCA2ren bainua: RCA1-ean bainatu ondoren, olata RCA-ren bigarren ontzian sartzen da, bigarren garbiketa bainu bat egiteko.
6. Bigarren ur bainua: RCA2-an bainatu ondoren, olata urez betetako ontzi batean sartzen da.
7. Lehorketa: Azkenik, aire-konprimatuz lehortu behar da hurrengo prozesurako prest gera dadin.

Pausu hauek jarraitu ondoren olata guztiz garbi dago gainazaleko ezpurutasunak kenduta.

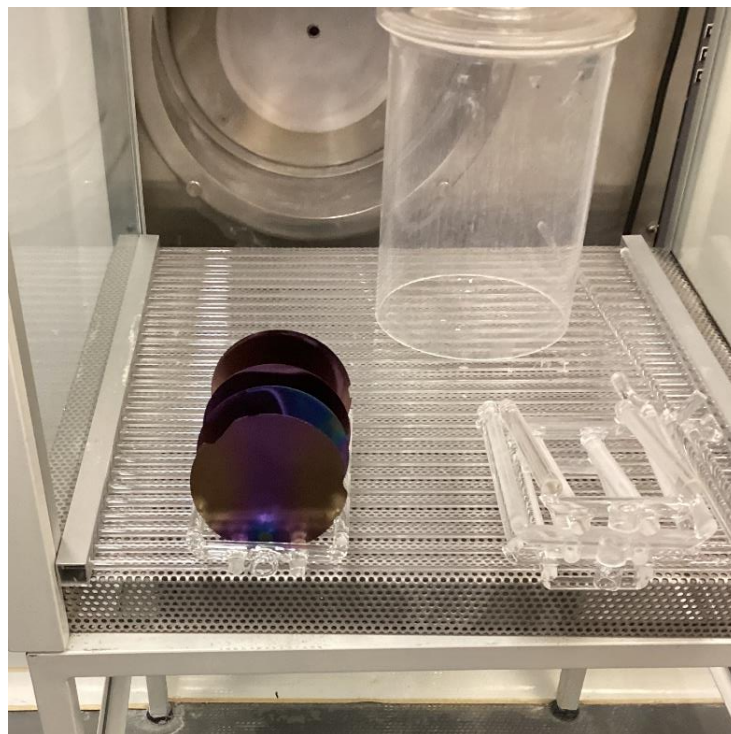


23. Irudia. Si olata garbiketa eta gero.

9.2 Fosforo dopaketa

Behin olata edozein kutsaduraz garbi dagoela, hurrengo pausoa labean fosforo dopaketa egitea izango da.

Fosforo difusioa modu eraginkor batean egiteko, labea $873\text{ }^{\circ}\text{C}$ -etara berotu da eta olatak 30 minutuz sartu da. Difusio denbora honek, prozesua behar bezala osatzeko aukera ematen du. Minutu hauetan, fosforo atomoek silizio kristal sarean posizioa hartzeko aukera dute, gailu erdieroaleen funtzionamendurako behar diren eskualde dopatuak eratzeko.



24. Irudia. Fosforo labetik ateratako txanda.

Irudian labetik ateratzean lortzen den emaitza agertzen da, txanda bakoitzean 4 olata erabiltzen dira. Irudian ikusi daiteke labera sartzeko erabiltzen diren behirako euskarriak. Kontu handiz kokatzen dira, olaten artean distantzia berdina erabiliz. Dopaketa uniformea egiten saiatzen bada ere, kontuan hartu behar da ertzetan kokatzen den olaten dopaketa eta erdiko olaten dopaketa ezberdina izan daitekeela.

9.3 Karakterizazioa

Fosforo dopaketa eta oxidazio prozesuen artean karakterizazio batzuk egin behar dira, hauen artean, olataren lodiera neurtu, geruzaren erresistentzia eta olataren bizitzaren denbora neurtu. Neurri hauek funtsezkoak dira prozesuen kontrol zehatza mantentzeko.

9.3.1 Lodiera neurtu

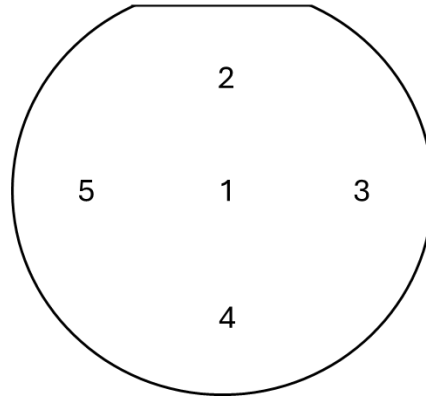
Olatak labean sartu baino lehen, hauen lodiera ezagutzea beharrezkoa da. Lortu den emaitza, siliziozko olataren lodiera garbiketa eta gero $480\ \mu\text{m}$ -koa da. Irudian ikusten den makina erabiltzen da.



25. Irudia. Lodiera neurtzeko makina.

9.3.2 Geruzaren erresistentziaren neurketa

Oxidazioa hasi baino lehen geruzaren erresistentzia neurtu da. Neurri hauek hartzeko lau puntako zunda erabili da, 8.3.1 puntuan azaltzen den metodoa erabiliz. Geruzaren erresistentzia neurtzeko, olata batean 5 neurketa egiten dira, irudian markatuta dauden puntuetan.



26. Irudia. Geruza erresistentziaren neurketa puntuak.

Hurrengo taulan lortutako balioen laburpena agertzen da. Aztertzen hari den txandan honetan lau olaten informazioa biltzen da. Olata bakoitzean 10 neurketa hartzen dira, aurreko eta atzeko geruzetan 5 neurketa bakoitzean. 9.2 fosforo dopaketaren atalean azaldu den moduan, emaitza hauekin nabarmentzen da olatak euskarrian kokatzerakoan hartzen duten posizioa eragina duela emaitzetan, lehenengo olatan eta 4. olatan lortutako emaitzak oso desberdinak dira eta.

7. Taula. Geruza erresistentziaren neurketak.

Neurketa puntua	Geruza erresistentzia (Ohm/□)									
	Aurreko geruza					Atzeko geruza				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1.olata	38.2	24.1	36.6	42.2	37.1	39.2	35.1	43.2	40.2	27.9
2.olata	36.3	35.5	34.1	38.0	34.0	36.0	37.8	34.2	35.5	35.2
3.olata	33.7	31.9	32.8	31.2	34.7	32.5	33.8	34.9	30.9	30.1
4.olata	46.9	44.0	47.3	46.8	45.6	45.8	45.0	45.9	46.5	41.4

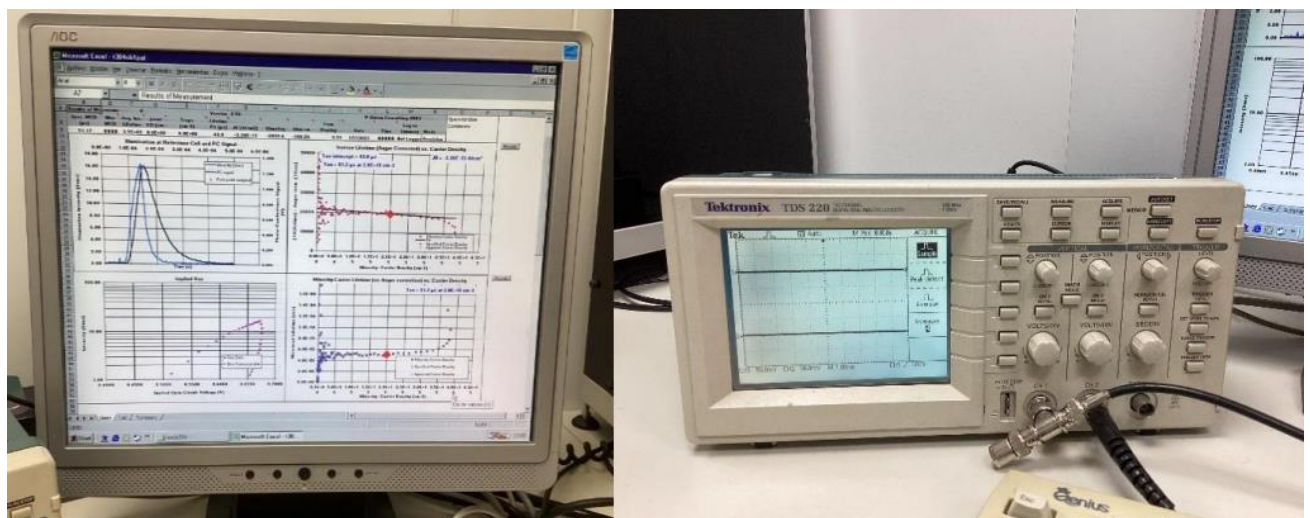
9.3.3 Bizitza-denbora

Aurreko atalean azaldu den moduan, dopaketa eta oxidazio prozesuen artean, olataren bizitza-denbora neurtzen da. 8.3.2 atalean azaltzen den makina erabilia, kalibrazioa eta

neurketa egin da. Konduktantzia neurgailuan olata kokatu da, hurrengo irudian ikusten den moduan. Osziloskopioaren laguntzaz, barneko wheatstone zubia kalibratuta uzten da neurketa zehatza egiteko.



27. Irudia. Konduktantzia neurgailua.



28. Irudia. Osziloskopioa eta ordenagailuaren grafikak.

Kalibrazioa egin ondoren, kutxa itxi eta flash-a aktibatu. Emaitza ondo kalkulatu ahal izateko, osziloskopioa ondo doitu eta gero bizitza-denboraren balioa irakurtzen da. Hurrengo taulan, aztertzen hari den tandem zelulen txandaren bizitza-denbora azaltzen da.

8. Taula. Olataren bizitza-denboraren emaitzen laburpena.

	Bizitza-denbora (μs)
1. Olata	81
2. Olata	59
3. Olata	180
4. Olata	16

9.4 Oxidazioa

Oxidazioa on bat egiteko beharrezkoa da olataren garbiketa ziurtatzea. Horretarako, olata oxidazio-labera sartu baino lehen garbiketa prozesu bat jarraitu da. 9.1 atalean egin den garbiketaren erauzketa kanpian burutu da. Kasu honetan, ezpurutasunak garbitzeko beharrezkoa da fluorhidriko bainua egitea. Lehenengo ur bainua egiten da, gero HF bainua eta azkenik berriz ur bainua. Amaitzean sikatu eta oxidazio labera eramaten dira olatak.

Prozesu hau pausoka azaldu baino lehen, olatak labean emango duten denboraren kalkuluak egin behar dira. 8.2.2 atalean azaldu diren formulak erabilita, oxidazio atalean, oxidazio lehorra eta hezean eman behar duen denbora kalkulatu da.

Kalkuluak burutzeko eranskinetan aurkitzen den SiO_2 *Color Chart* taulan begiratu da lortu nahi den kolorea eta honi dagokion geruza lodiera. Kasu honetan *Royal Blue* kolorea espero da, beraz, $1250 \text{ \AA} = 125 \text{ nm}$. Labean erabili den tenperatura $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ izan da. 8.2.2 atalean azaldu diren formulak erabilita, hurrengo kalkuluak egin dira. Kalkulu hauek egin ondoren lortuko den hazkunde totala 136 nm izango dira.

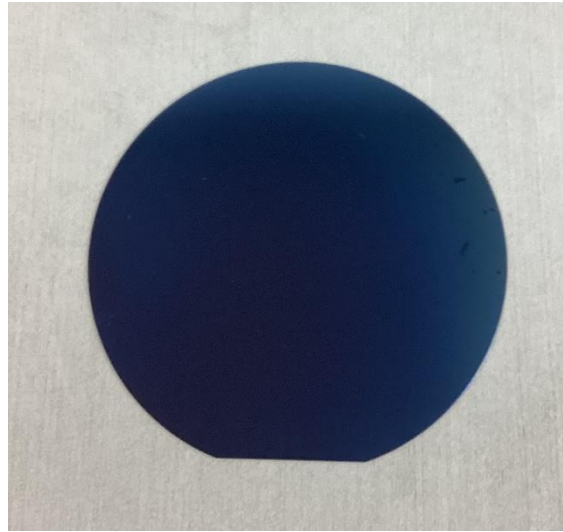
9. Taula. Oxidazio prozesuen kalkuluak.

Oxidazio prozesuak Si-Perovskita tandem			
Oxidazio lehorra (3') + oxidazio hezea (5') + oxidazio lehorra (4')			
Oxidazioa mota	Oxidazio hazkundera (μm)	Beharrezko datuak	
Oxidazio lehorra (3')	8,03E-03	Tenperatura (K)	1373
Oxidazio hezea (5')	1,18E-01	Boltzmann konstantea K(eV/k)	8,62E-05
Oxidazio lehorra (4')	1,05E-02	Hazkunde totala (nm)	1,36E+02

Oxidazioa egiteko hiru zatitan banatzen da. Oxidatu nahi diren olatak labean sartzen dira. Labearen kanpoko kontrolaren laguntzaz, oxidazio lehorra ete hezearen arteko konbinazioa egiten da planifikatu diren emaitza lortzeko:

- a. Oxidazio lehorra: 3 minutu.
- b. Oxidazio hezea: 5 minutu.
- c. Oxidazio lehorra: 4 minutu.

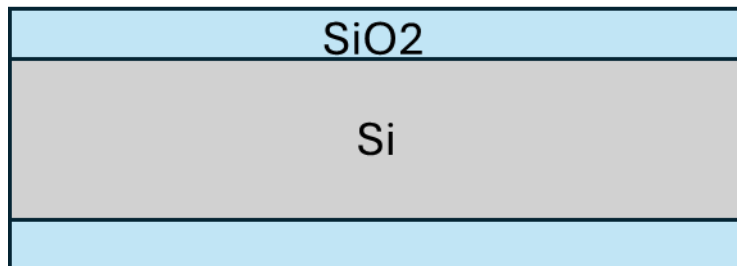
Dopaketa eta oxidazioa egin ondoren, irudian ikusten da olataren emaitzaren argazkia. Konprobatu daiteke lotutako koloreak bat egiten duela hasiera batetik eraskinetan aurkitzen den *color chart* taulatik aukeratutakoarekin.



29. Irudia. Olata oxidazioa egin ondoren.

9.5 Fotolitografia

Olataren oxidazioa egin ondoren, tandem zelula irudian azaltzen den geruzez osatuta dago. Siliziozko olata eta gainazalean oxidazioa egin denez, SiO_2 .



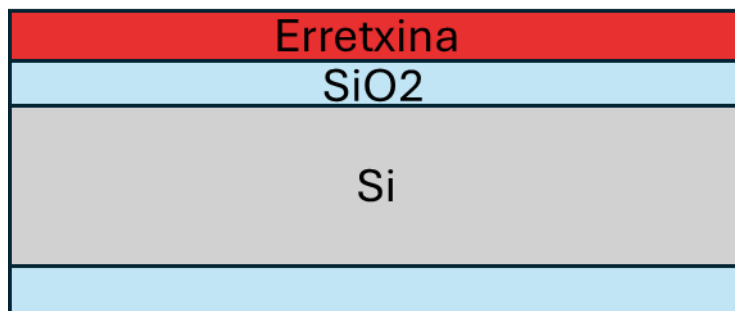
30. Irudia. Olataren geruzak. Fotolitografia hasi baino lehen.

Fotolitografiaren prozesuarekin hasteko lehenengo pausoa erretxina geruza bat gehitzea da. Erretxina kokatzeko, 8.2.3 atalean azaltzen den spinner makinan kokatzen da olata, honen mugimendu zirkularrari esker eta pipeta baten laguntzaz, erretxina modu uniforme batean zabaltzen da. Irudian ikusten dira olatak erretxinarekin.



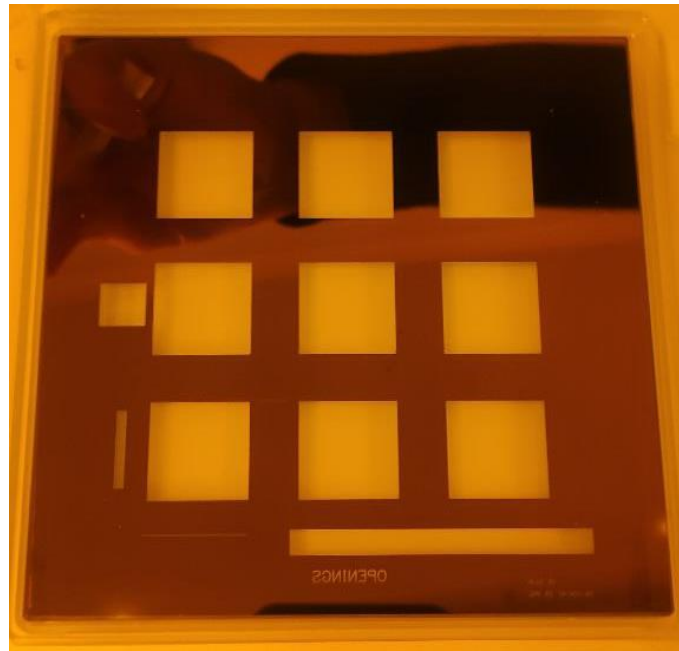
31. Irudia. Olatak erretxina kokatu ondoren.

Hurrengo pausoa, olatak labean sartzen dira 100 °C-etara 30 minutuz. Pauso honetan, hurrengo irudian ikusten den geruzaz osatuta dago olata.



32. Irudia. Olataren geruzak. Erretxina kokatuta.

Behin erretxin lehortu dela, argi esposizioa egiteko makinan jarraituko da prozesua. Hurrengo irudian ikusten den maskara erabiliko da. Leiho karratuak irekitzea lortu nahi da.



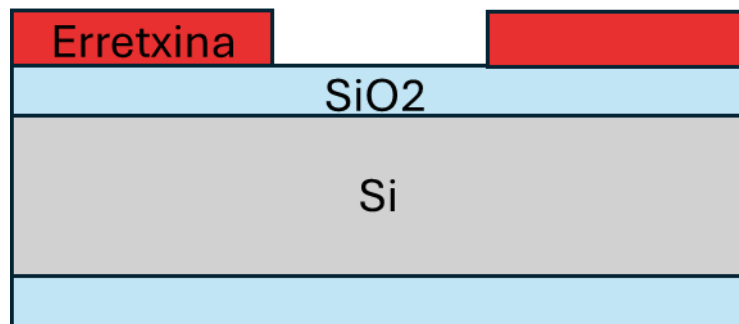
33. Irudia. Litografian erabilitako maskara.



34. Irudia. Olata argi esposiziorako makinan kokatuta.

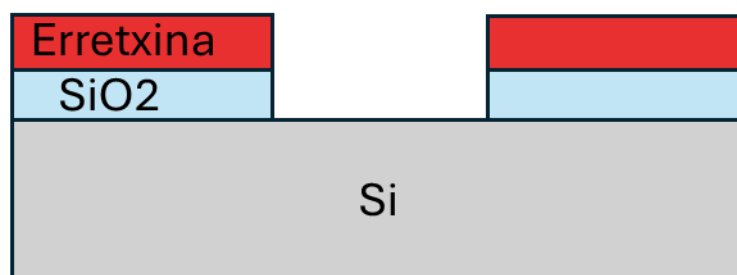
Aurreko irudian agertzen den makinan, maskara eta olata kokatzen dira. Momentu honetan olata 15 segundoz argiztatuko da. Olata ateratzean, argiztatu den erretxina zatiak degradatuta egongo dira. Oraindik begi bistara ezin dira leihoak ikusi.

Hurrengo pausuan, degradatutako erretxina kentzen da. Erretxina bakoitzak errebelatzaile espezifiko bat erabiltzen du. Kasu honetan MF-319 izenekoa erabili da. Erauzketa kanpian olatak errebelatzailean sartu dira degradatutako erretxina kentzeko. Hurrengo irudian puntu honetan dauden geruzen eskema azaltzen da.



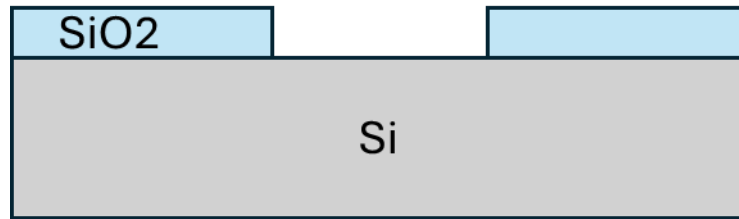
35. Irudia. Degradatutako erretxina kendu ondoren geruzen diren geruzak.

Leihoak ireki ondoren, SiO₂ oxidoa agerian uzten da. Hurrengo pausoa ikusten den SiO₂ geruza kentzea da. Oxidoa desagiteko kimika gelan HF an bainu bat egin behar da. Oxidoaren geruza 125 nm-koa da. Froga ezberdinak egin ondoren egiaztatu da erretxina ez kaltetzeko gehienez 4'30" egon ahal dela fluorhidrikoaren bainuan. Beraz, ikusgarri dagoen SiO₂ zatia kendu da eta aldi berean erretxinak babesten duen oxidoa ez da kaltetu. Geruzen eskema berria hurrengo irudian ikusten da.



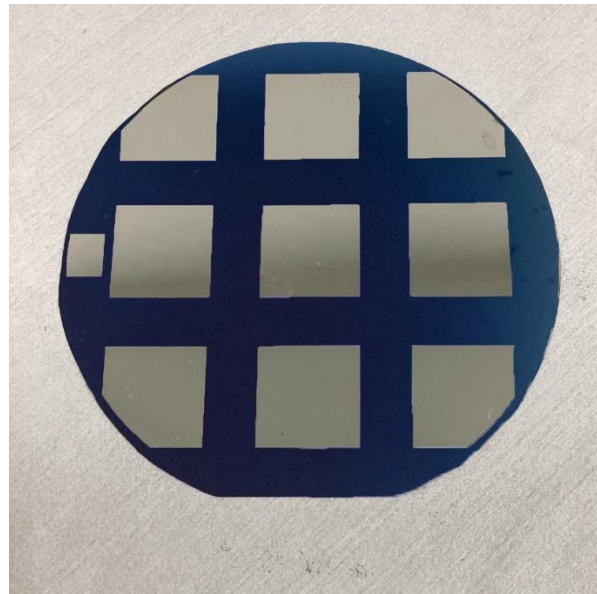
36. Irudia. Ikusgarri zegoen SiO₂ geruza garbituta

Fotolitografiaren azken pausoa, soberan dagoen erretxina garbitzea da. Lurrunketa kanpai batean azetona bainu bat egin da. Erretxina kendu ondoren, olata guztiz garbitzeko, IPA bainu bat egiten da. Momentu honetan siliziozko leiho karratuak agerian uzten dira eta olataren bestelakoa SiO₂ geruzaz osatuta dago. Hurrengo bi irudietan geruzen eskema eta azkenengo emaitzaren argazkia azaltzen da.



37. Irudia. Fotolitografia amaituta lortzen den geruzen eskema.

Hurrengo irudian, olataren argazkia ikusten da. Fotolitografia bitartez ireki diren leihoak aztertzen dira, gris koloreko laukiak, silizioa. Olataren gainerako materiala *royal blue* kolorea, SiO₂ oxidazioaren kolorea.

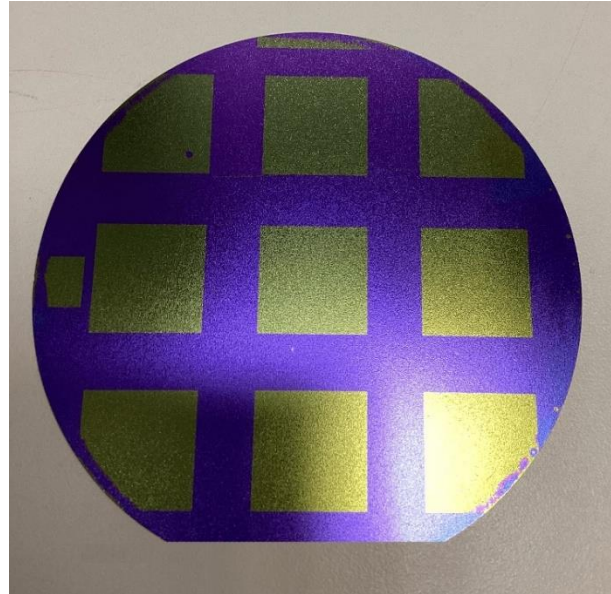


38. Irudia. Oxidazio leihoak ireki ondoren lortutako olata.

9.6 ITO geruza

Aurreko atalean, fotolito prozesua erabilita, irudian ikusten den moduan, olataren oxido geruzan leihoak irekitzea lortu da. Hurrengo pausoa, ITO geruza kokatzea da. Deposizio hau Tekniker laborategian egin da.

Hurrengo irudian ikusten da teknikeretik jasotako emaitza.



39. Irudia. ITO geruza.

9.7 ITO Geruzaren erresistentziaren neurketa.

Teknikerretik jasotako datuak ziurtatzeko, lau puntako zunda erabilia, geruza erresistentzia neurtu da. 9.3.2 puntuan egin den moduan neurketa ezberdinak hartu dira, hurrengo taulan azalduta. Kasu honetan bakarrik ITO geruza neurtu nahi denez, olata bakoitzean aurpegi bakarra neurtu da eta bakoitzean bost neurri. Neurketa puntuak 26. argazkian azaltzen direnak izan dira. Azpimarratzekoa da laugarren olata apurtu egin dela eta neurketa bakarra egin zen.

10. Taula. ITO geruza erresistentziaren neurketak.

Geruza erresistentzia (Ohm/□)					
Neurketa puntua	1	2	3	4	5
1.olata	15.8	15.4	15.4	15.2	16.1
2.olata	15.1	15.1	15.6	15.2	15.2
3.olata	15.4	16	15.6	15.6	15.9
4.olata	14	-	-	-	-

9.8 Elipsometro bidezko karakterizazioa

Neurketa egiteko, olata elipsometroaren erdian kokatzen da. Argi polarizatuek olata jotzen du eta neurketak egiten ditu. Neurketak bildu ondoren, errefrakzio indizea eta kokatutako azkenengo geruzaren lodieraren estimazioa egiten da. Lehenik eta behin,

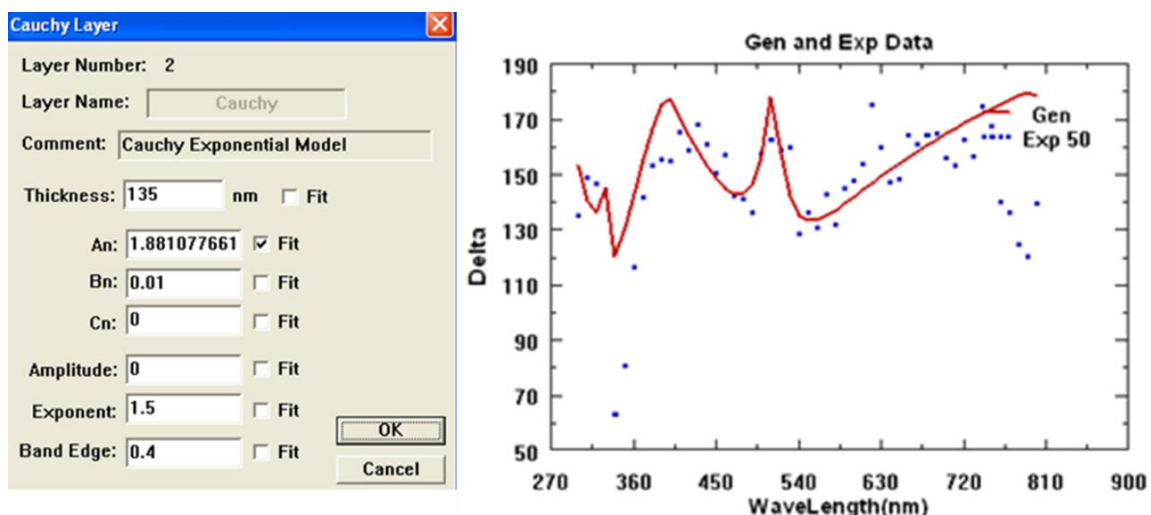
ordenagailuan dagoen softwarean lortutako datuak kargatzen dira, eta substratuaren ezaugarriak hautatzen dira. Hurrengo taulan parametroen bilketaren laburpena agertzen da, geruzen lodiera eta material mota aipatzen.

11. Taula. Elipsometroaren doiketa datuak

Materiala	Material mota	Geruzaren lodiera
ITO	Eroalea	135 nm
SiO ₂	Dielektrikoa	125 nm
Si	Erdieroalea	480 nm

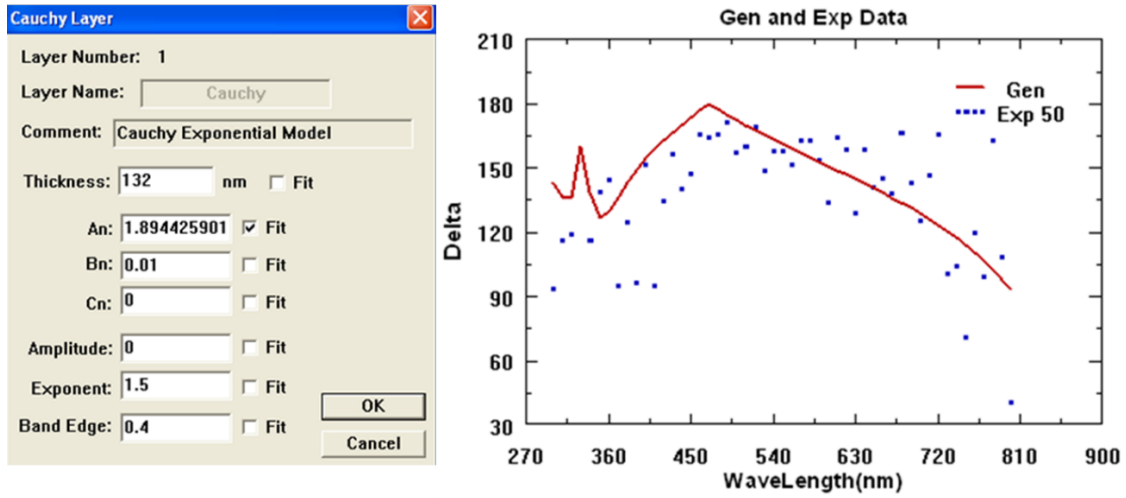
Behin datuak kargatuta, olata bakoitzaren neurketak egin dira. Hurrengo grafiketan neurtu diren hiru laginen emaitzak aurkezten dira. Erabiltzen den programa honetan, neurtutako balioekin kurba bat sortzen du eta espero den kurba egokiarekin doitzen da. Irudietan ikusten den informazioa hurrengoa da: Alde batetik, grafikoan, sortutako datuak (Gen) eta datu esperimentalen (Exp) arteko konparazioa ikusten da. Kurba gorria sortutako datuak eta puntu urdinak datu esperimentalak dira. Sortutako kurba puntu esperimentaletara egokitzen saiatzen da. Grafikak aparte, *Cauchy* laginaren informazioa agertzen da, non, *An* parametroa eta lodiera balioak ikusten diren.

- Lehenengo lagina



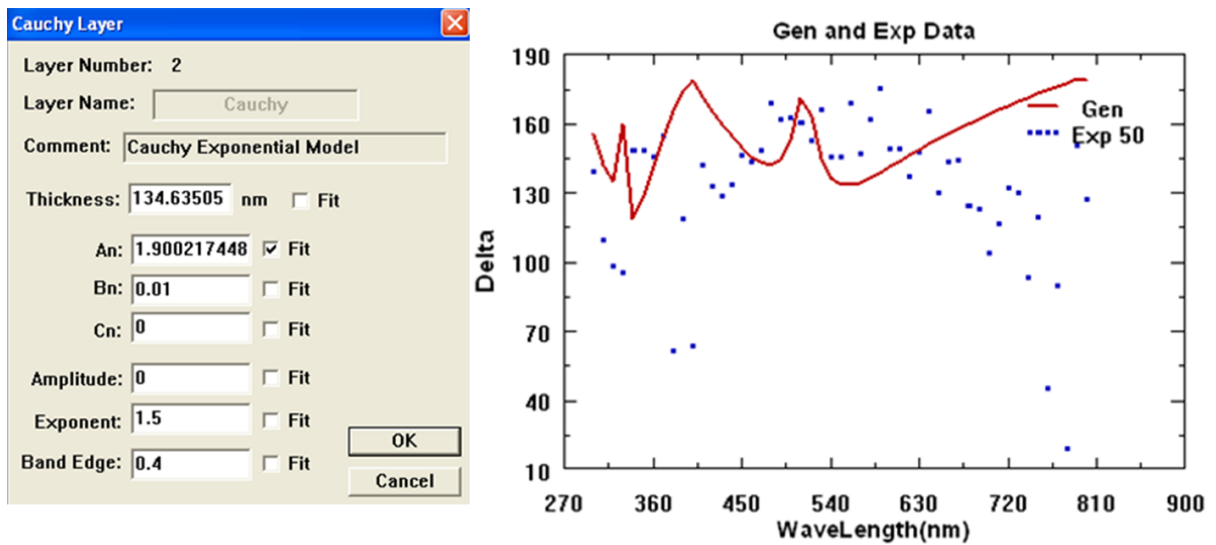
40. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoak. 1. lagina.

- Bigarren lagina



41. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoa. 2. lagina.

- Hirugarren lagina



42. Irudia. Elipsometroaren neurketatik ateratako grafikoa. 3. lagina.

Hurrengo taulan, hiru laginen emaitzen laburpena azaltzen da. An parametroaren balioaren eta neurtu den geruzaren lodieraren balioak agertzen dira.

12. Taula. Elipsometroaren emaitzak.

Lagin zenbakia	An	Geruza lodiera (nm)
1. Lagina	1.88	135
2. Lagina	1.89	132
3. Lagina	1.9	135.6

9.9 Laser isolamendua eta mozketa

Bi teknika hauek egin baino lehen froga ezberdinak burutu dira laserrean. Laserraren doiketak egiteko kontuan hartu behar dira hurrengo parametroak: Lehenengo eta behin ordenagailuan koordenatu zehatzak sartu. Froga batzuk egin ondoren, laserrak egingo dituen pasatze kopurua zehaztu. Parametro hau ondo erabakitzeko, GR eta IR bi laserren artean froga ezberdinak egin dira.

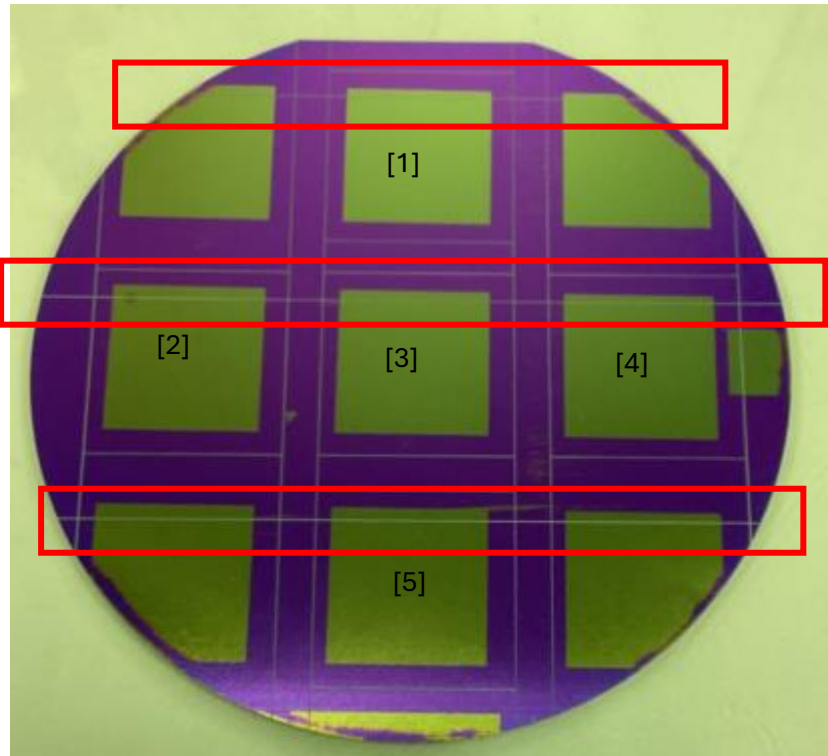
Laser mozketan eragina duen beste parametroa A/B/C, putsuaren maiztasuna (kHz), potentzia (W) eta laserraren eskanerraren abiadura (mm/seg) adierazten dute hurrenez hurren. Taulan, z balioaren informazioa ematen da, laserraren doiketa egiterakoan beste parametro garrantzitsua da. Laserraren fokatze puntua egokitzeko balio du, mozketa egiterakoan potentzia handiagoa lortzeko. Kasu honetan, taulan ikusten den moduan, z doiketa ziurtatzeko, hiru balio ezberdinekin egin da mozketa. Isolamendua aldiz, ez da hain potentzia handirik behar eta z balio bakarra erabili da, olataren osotasuna mantentzeko.

Froga ezberdinak egin ondoren, hurrengo taulan zehaztutako doiketak azaltzen dira.

13. Taula. Laserrean egindako doiketak.

Mozketa/ Isolamendua	Izpi mota	A/B/C	Pasatze kopurua	z balio	Zenbatetan errepikatu
Isolamendua	IR	90/38/5	8	-4.8	1
Mozketa	IR	90/38/50	10	-4.8	1
Mozketa	IR	90/38/50	10	-4.3	1
Mozketa	IR	90/38/50	10	-4.5	2

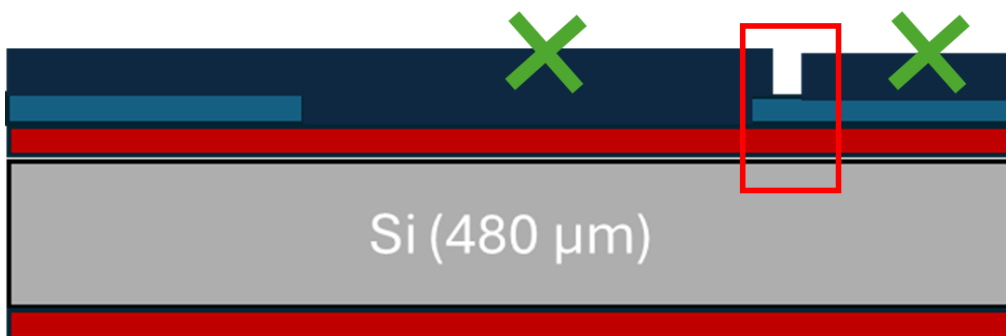
Hurrengo irudian ikusten den moduan, oso garrantzitsua izan da mozketa eta isolamenduaren koordenatuak ondo kalkulatzeko. Olata zirkular bakoitzetik 4 zelula aterako dira, irudian adierazitakoak. Gorriz inguratutako marrak isolamenduaren bidezko marrak dira, olataren mutur batetik bestera zeharkatzen dute. Bestelako marrak, mozketa egiteko dira.



43. Irudia. Mozketa eta isolamendua egindako olata.

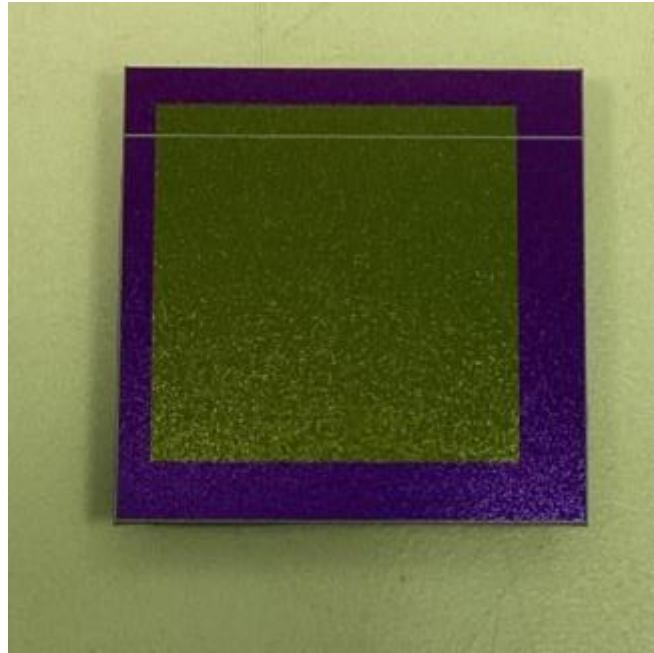
9.9.1 Laser isolamenduaren konprobaketa

Isolamendua egin baino lehen, froga ezberdinak egin dira. Irudian markatuta dagoen zuloa, lortu nahi den emaitza da. Puntua hau, isolamendua, ondo egin dela konprobatzeko berdez markatutako bi gurutzetan voltmetroa kokatu da. Irakurritako erresistentzia balioaren arabera azkenean doiketa bat zehaztu da isolamendua egiteko.



44. Irudia. Isolamenduaren marrazkia.

Ikerketa egin ondoren, isolamendua lortzeko parametroak zehaztu dira. IR izpia erabili da, z balioa -4.8 eta $90/38/5$. Isolamendua lortzeko eta zelula ez apurtzeko, 8 pasatze egitea erabaki da. Parametro hauek ezarrita, hurrengo irudian agertzen da lortutako emaitza finala.

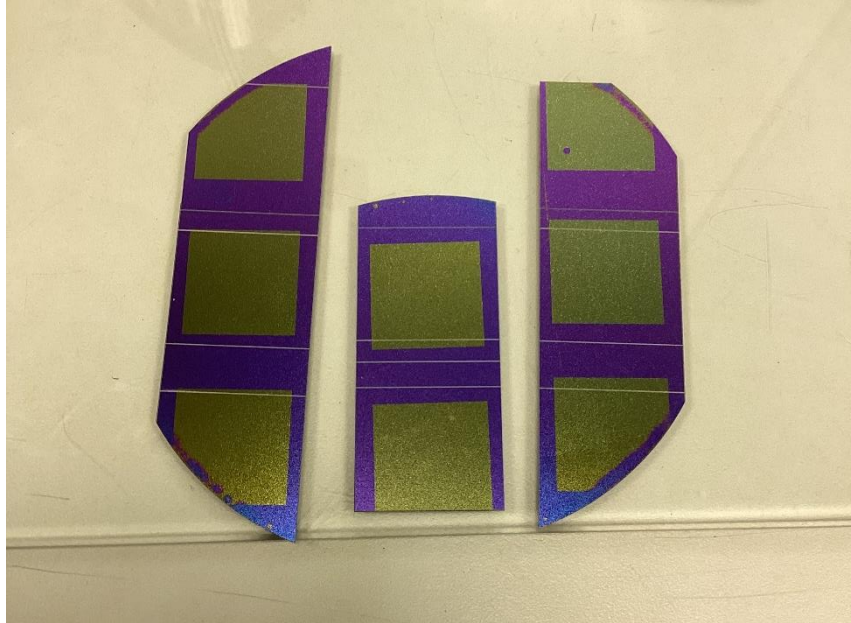


45. Irudia. Isolamenduaren emaitza.

9.9.2 Laser mozketa

Isolamenduaren marrak egin ondoren, mozketa koordenatuak kalkulatu dira. Lortu nahi diren zelulak 25.4×25.4 mm neurria izan behar du. Isolamenduak, ertzarekiko 4 mm-ko distantzia dauka.

Mozketa egiterako froga ezberdinak egin dira ere. Laserrean sartu, koordenatuak markatu eta aurreko taulan azaldutako doiketak ezarri dira. Laserra amaitzerakoan eta olata ateratzerakoan, zelulak banandu dira. Hurrengo irudian ikusten den moduan, partzialki bananduta dago olata.



46. Irudia. Mozketak eta isolamendua.

Olatatik zelulak banatzeko, kontu handiz egin da. Mozketa egiteko marretatik banatzeko baina isolamendu marrak ez apurtzeko.

9.10 Mikroskopiaorekin isolamenduaren azterketa

Olatak laserretik ateratzerakoan, emaitzak mikroskopiaan aztertu behar dira. Atal honetan azkenengo emaitzara heltzeko egindako saiakerak erakusten dira.

9.10.1 IR eta GR arteko konparaketa.

Puntu honetan IR eta GR laserren arteko azterketa egin da. Lehenengo eta behin parametro desberdinak konprobatu dira. Hurrengo taulan azaltzen da IR eta GR konparaketa eta kasu bakoitzean lortu den sakonera. Lehenengo taulan IR informazioa ageri da, bigarreanean GR izpiaren informazioa.

14. Taula. IR laserrarekin egindako frogak.

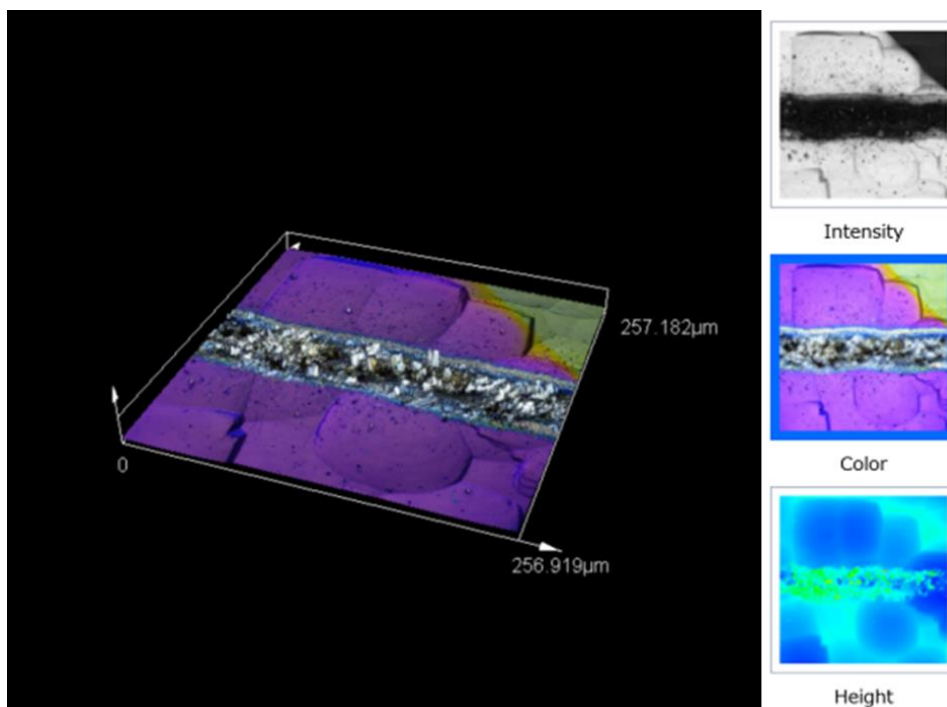
Froga zenbakia	A/B/C	Pasatze kopurua	Sakonera (μm)
1	90/38/5	1	12
2	90/25/5	1	2.6
3	90/10/5	1	0.3
4	180/38/5	1	0.43
5	180/38/5	5	2.46

15. Taula. GR laserrarekin egindako frogak.

Froga zenbakia	A/B/C	Pasatze kopurua	Sakonera (μm)
1	90/38/5	1	0.4
2	90/25/5	1	0.07
3	90/10/5	1	-
4	180/38/5	1	0.4
5	180/38/5	5	0.4

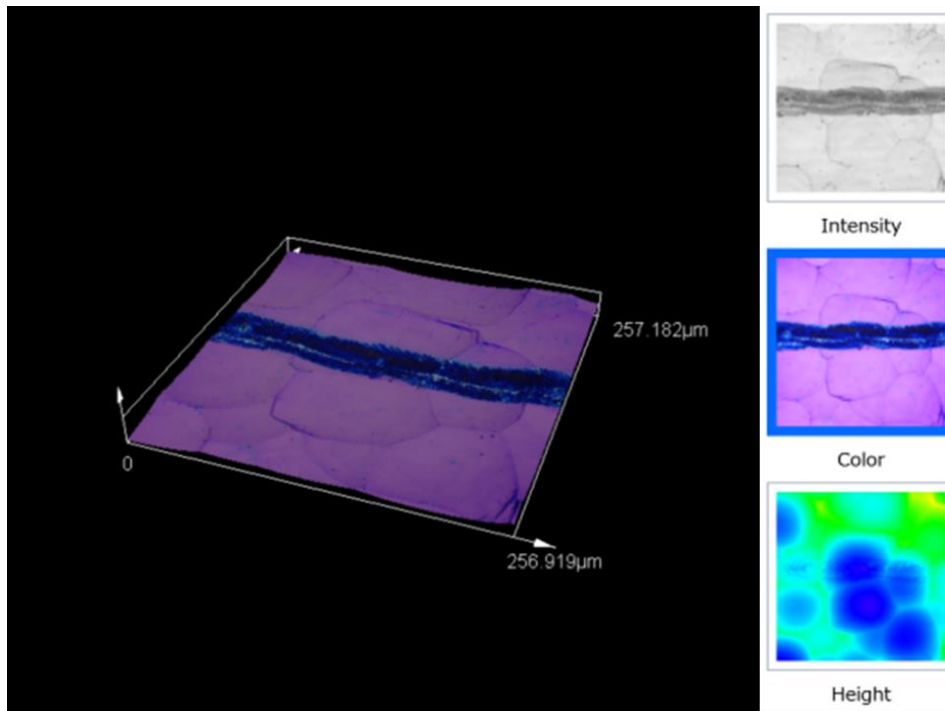
Argazkietan ikus daiteke IR izpiaren indarra, GR izpiarekin alderatuta. Grafiko hauetan ikus daitekeenez, laser infragorriak laser berdeak baino lerro sakonagoak sortzen ditu. Grafikoan dauden koloreek erakusten dute nola IR lerroa isolatzeko sakonera-mailara iristen den, ITO geruza erabat gaindituz eta oxido-geruzaraino iritsiz. Aitzitik, GR laserraren ebakidura gainazalean geratu da eta ezin du oxido-geruzaraino zeharkatu. Argazki hauetan erabili diren parametroak: 180/38/5 eta 5 pasatze. Emaitzak aztertu ondoren, erabaki da IR laserraren azterketa egitea, parametro egokiak erabakitzeko. Azterketa 3D mikroskopioaren bitartez egin da.

- IR: Neurtutako sakonera: 2.46 μm .



47. Irudia. IR isolamendua.

- GR: Neurtutako sakonera: $0.4 \mu\text{m}$.



48. Irudia. GR isolamendua.

Isolamenduaren eragina egiaztatzeko multimetroaren bitartez serie erresistentzia neurtu da. ITO materiala eroalea da, geruza hau erabat hausten ez bada, neurtutako erresistentzia txikiagoa izango da. SiO₂ aldiz, isolatzaile elektrikoa da. Lerroaren sakonera oxido geruzara iristen bada eta ITO geruza benetan isolatzen badu, erresistentzia handia izango du. Beraz, erresistentzia balio baxua lortzen bada, esan nahi du egindako lerroaren sakonera ez dela efizientea. Erresistentzia balioa altua bada, beharrezko sakonera lortu da SiO₂raino heltzeko eta ITO geruza isolatuta egongo da.

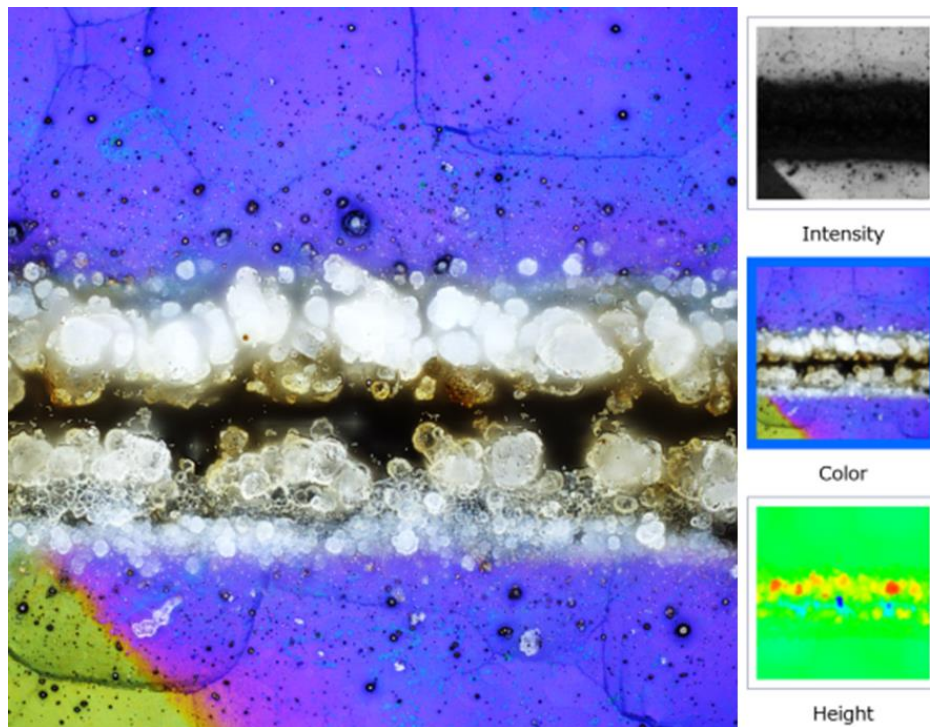
Hurrengo taulan serie erresistentziaren balioak agertzen dira IR izpiaren parametro ezberdinak erabilita. 6 froga egin dira eta bakoitzak sortzen duen erresistentzia balioa adierazten da.

16. Taula. Serie erresistentziaren neurketa.

Froga zenbakia	A/B/C	Pasatze kopurua	Sakonera (μm)	Serie erresistentzia
1	90/38/5	1	1.7	73
2	140/38/5	1	1.08	58
3	180/38/5	1	0.43	55
4	90/38/5	5	2	70
5	140/38/5	5	0.65	62
6	180/38/5	5	2.46	55

9.10.2 IR isolamendua eta mozketak

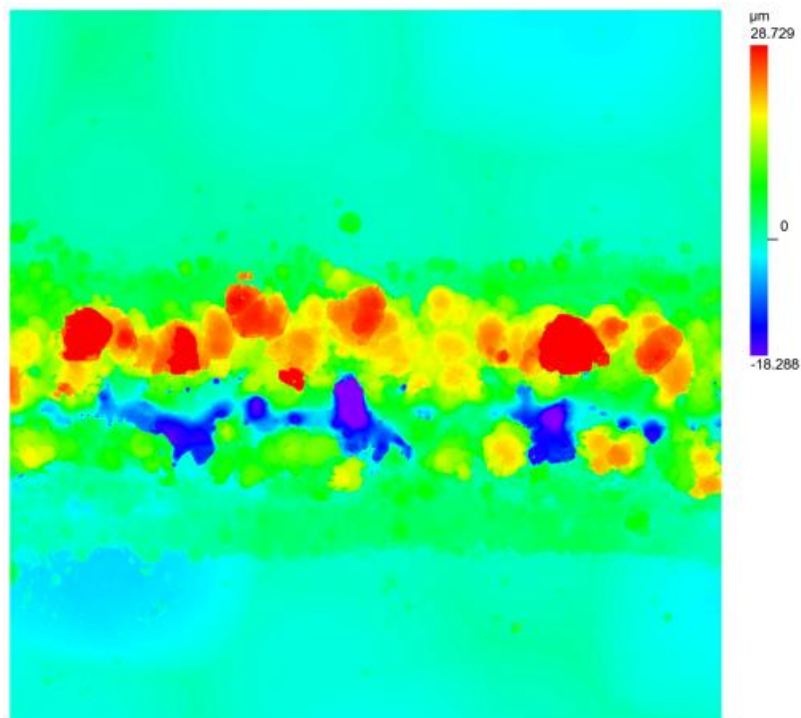
Azterketa sakona egin ondoren, IR arekin egindako isolamendua aukeratu da, 90/38/5 eta 8 pasatze. Irudian azaltzen da mikroskopioarekin lortutako irudia.



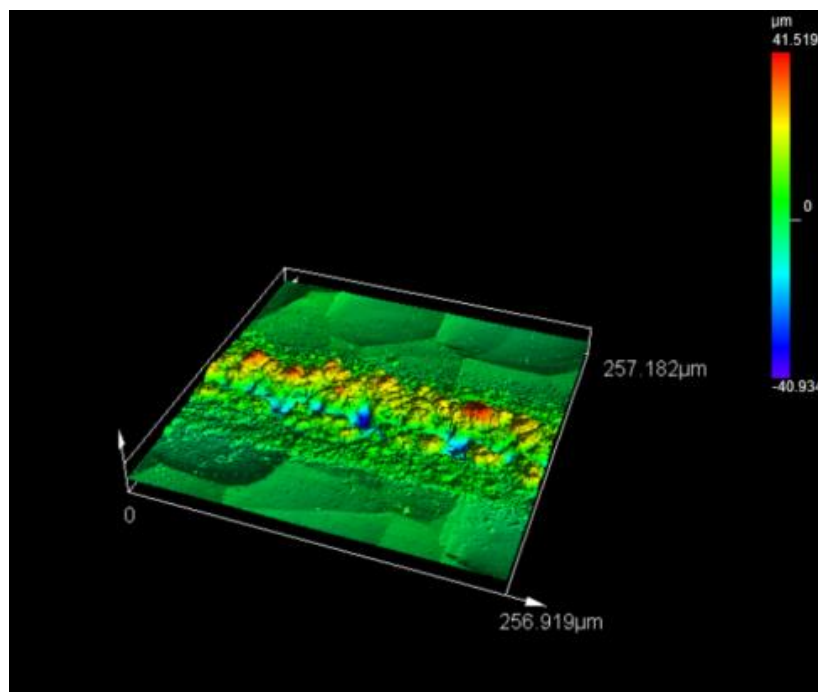
49. Irudia. Isolamenduaren argazkia.

Irudiari begiratu, isolamenduaren irudikapen guztietan, intentsitatea, kolorea eta altuera ikusiz gero, laserrak ITO geruza erabat sartzea lortu du, SiO₂ geruzara iritsi

arte. Hau beharrezkoa da isolamendu eraginkorra lortzeko. Hurrengo irudietan, isolamenduaren datuak agertzen dira, non sakonera hobeto antzeman daitekeen.



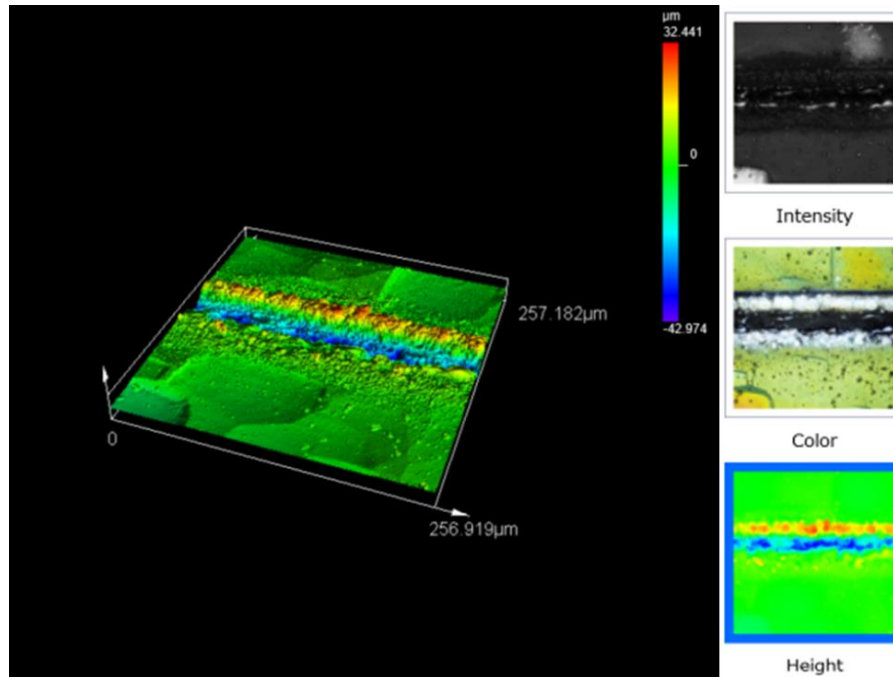
50. Irudia. Isolamenduaren argazkia, altuera grafika (I).



51. Irudia. Isolamenduaren argazkia, altuera grafika (II).

Mozketa egiteko hurrengo parametroak erabili dira, 90/38/5 10 pasatze egiten. Aurreko irudiarekin antzeman daiteke sakonera gehiago duela, honen helburua bi zatiak banatzea

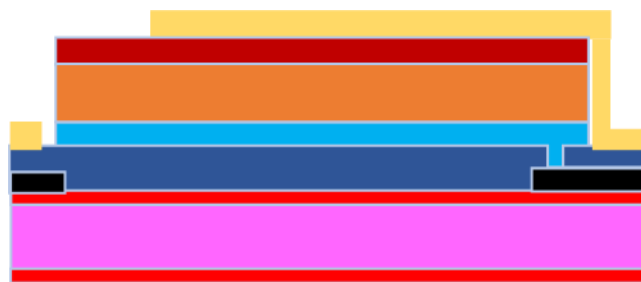
delako. Laserretik aterata lortzen den lerroa ikusten da. Honen ondoren, kolpe zehatza bat emanez, olataren banaketa lortzen da, *cleavage*.



52. Irudia. Laser mozketa.

9.11 BCMtik jasotako emaitzak

Orain arteko egitura dauka silizioa eta ITO geruza. Orain, perovskita depositatzea eta metalizazioa falta dira.. Zelula guztiz osatzeko, BCM laborategira bidali da eta hemen siliziozko egituraren beharrezko geruzak gehitu dira perovskitako egitura amaitzeko. Hurrengo irudian, geruzen eskema ikusten da. Siliziozko egitura perovskitarekin batera.



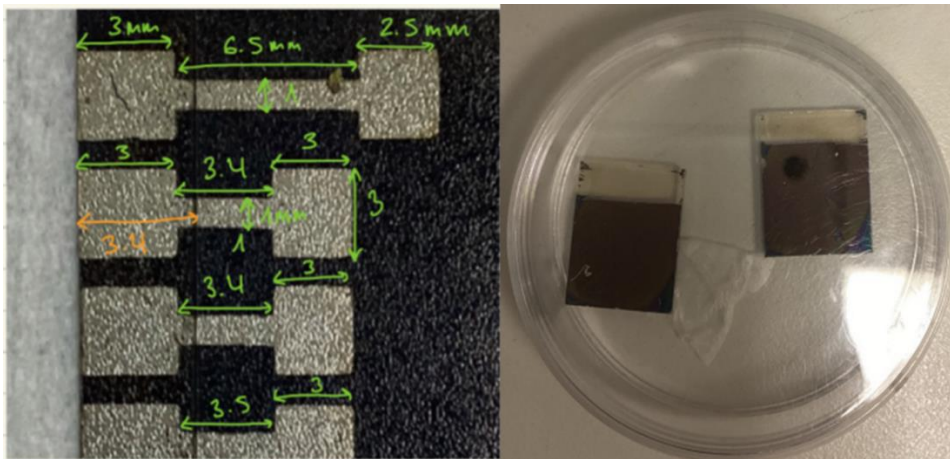
53. Irudia. Tandem zelularen geruzen eskema.

BCM laborategitik tandem zelulen bi txanda jaso dira. Lehenengo txandan metalizazio prozesu batekin eta bigarren txandan metalizazio gabe. Hurrengo taulan bi txandetan egindako neurketen bilketa azaltzen da. BCMk beraz tandem egitura osoa itzuli du. Orain eguzki-zelula karakterizatzeko I-V kurbak neurtu behar dira. Emaitzetan ikusten

da lortutako tentsioa nahiko baxua dela, lortutako balio altuena (V_{oc}) 600 mV-ekoa izanik.

17. Taula. BCM laborategitik jasotako zelulen neurriak.

Txanda	Isc (mA)	Voc (mV)
1.Txanda, metalizazioarekin.	40	103
	22	108,5
	12	123
	5,8	141
2.Txanda, metalizazio gabe.	0.51	600
	0.24	550
	0.12	440
	0.06	400



54. Irudia. BCMtik jasotako lehenengo eta bigarren txandaren zelularen argazkia.

Aurreko irudian, BCM laborategitik jasotako bi zelula ageri dira. Lehenengo irudian, egindako metalizazioaren neurriak agertzen dira. Jasotako bigarren txandan aldiz, metalizazio gabe eskatu zen eta eskumako irudian ikusten diren zelulak dira.

9.12 Emaitzen ondorioa

Fabrikazio prozesua eta zelularen karakterizazioa egin eta gero, atal honetan lortutako emaitzen berri emango da.

Oxidazio prozesuaren aldetik, egindako kalkuluak eta lortutako emaitzak bat egin dute. 9.4 atalean azaldu den moduan lortu nahi den emaitza *color chart* ean begiratuta *royal blue* lortzea da, 29.irudian ikusten den moduan oxidazio prozesua egokia izan dela adierazten du. Fotolitografiaren kasuan, olatan leihoak irekitzeko erabili den teknika behar bezala atera da, pausu asko burutu behar izan badira ere, zelularen irudia zehaztasunez sortu da.

Aztertu behar izan den beste puntu bat, teknikerretik jasotako zelulak izan dira. Datu hauek egiaztatzeko, elipsometroa eta lau puntako zunda erabili da eta emaitza fidagarriak lortu dira, zelularen geruza erresistentzia eta ITO materialaren lodiera egokiak direla erakutsiz. Laserra erabili ondoren, mikroskopioaren laguntzaz, bi kontaktuak behar bezala isolatu direla bermatu da.

Azkenik, siliziozko egiturari perovskitako zelula gehitu zaio BCM laborategian, tandem zelula sortuz. 9.11 puntuan aztertu daiteke azkenengo zelularen neurketak. Perovskitako zelula batean espero den emaitza 1.32 Veko tentsioa izaten da. Kasu honetan, egindako neurketak tandem zelula izanez, 110 mVeko eta 600 mVeko tentsioak lortu dira. Emaitzak txarrak izan direla ikusita hurrengo hipotesiak atera dira: Alde batetik pn egitura txarto egin dela edo zelulan zirkuitu laburtuta egon daitekeela.

Emaitza hauek aztertuta, etorkizunerako lerroetan pentsatu da. Proiektuan azaltzen den tandem zelularen egitura $p/n+p/n$ da, beraz, hurrengo urratsa egitura ezberdin batekin proba egitea izango litzateke. Bizitza-denbora eta pn egitura egiaztatuz.

TiM laborategian, tandem zelulen lehenengo txandak izan dira eta prozesuak hobetzeko lagundu dute. Kontuan hartu beha da beste laborategi batzuekin lan egin dela, tekniker eta BCM, honek arazoak ekar ditzake komunikazio edo informazio faltagatik. Hori dela eta, etorkizun hurbilean datu egiaztapena eta komunikazio zehatzagoa bermatzea ezinbestekoa izango da.

10. Lanerako erabilitako metodologia

Atal honetan proiektua burutzeko jarraitu den metodologia azaltzen da. Alde batetik lanaren zeregina. Paketeetan eta azpipaketeetan antolatuta. Hurrengo puntuan, Gantt diagramaren grafikoa azaltzen da. Grafikoa pakete eta azpipakete bakoitzaren antolakuntza denboran erakusten da.

10.1 Lanaren zereginak

Atal honetan, proiektua burutzeko jarraitu den planifikazioa azalduko da. Proiektu honetan lan-pakete eta azpipakete hauen helburua eta bakoitzak behar izan duen entrega gaia erakusten da. Bost pakete nagusietan banandu da.

18. Taula. Lan paketeen azalpena.

1.Lan-paketea	Helburua: Lanaren gaia finkatu eta dokumentuaren formatua zehaztu. Entrega gaia: Dokumentuaren hasierako eskema	
	Azpipaketea:	Helburua: Helburuak definitu. Entrega gaia: Helburuak zehazten dituen eskema.
	Azpipaketea:	Helburua: Zereginak definitu. Entrega gaia: Zereginak definitzen dituen eskema.
	Azpipaketea:	Helburua: Beharrezko baliabideak ezarri. Eskura aurkitzen diren baliabideen artean erabakiak hartu. Entrega gaia: Baliabideen zerrenda eta esleipena.
	Azpipaketea:	Helburua: Dokumentazioa. Entrega gaia: Proiektuaren dokumentazioa.
2.Lan-paketea	Helburua: Hasierako azterketa egin. Entrega gaia: Zehaztapenen txostena.	
	Azpipaketea:	Helburua: Geruza bakoitza sortzeko eta honen karakterizazioa burutzeko erabiliko diren teknikak zehaztu. Entrega gaia: Teknika ezberdinak zehazten dituen dokumentua.
	Azpipaketea:	Helburua: Geruzen diseinua zehaztu. Entrega gaia: Geruzen diseinuaren eskema eta honen justifikazioa.
	Azpipaketea:	Helburua: Makinen aukeraketa.

		Entrega gaia: Makinen aukeraketa eta haien ezaugarriak zehaztu.
3.Lan-paketea	Helburua: Fabrikazioa. Entrega gaia: Fabrikazio prozesu bakoitzaren txostena eta olaten aurkezpena.	
	Azpipaketea:	Helburua: Garbiketa. Entrega gaia: Prozesuan egingo diren pausoak, materialak eta teknikak zehazten dituen txostena. Laborategian lortutako olataren aurkezpena.
	Azpipaketea:	Helburua: Difusioa eta oxidazioa. Entrega gaia: Labean egon beharreko denboraren kalkuluen emaitza eta jarraitu beharreko pausak azaltzen duen txostena. Laborategian lortutako olataren aurkezpena.
	Azpipaketea:	Helburua: Fotolitografia. Entrega gaia: Erabiliko diren makinak, produktu kimikoak eta atal bakoitzaren zehaztapenak biltzen dituen dokumentua. Laborategian lortutako olataren aurkezpena.
	Azpipaketea:	Helburua: Laser isolamendua. Entrega gaia: Laser makinan egin beharreko doiketak eta pausoak zehazten dituen dokumentua. Olaten aurkezpena.
	Azpipaketea:	Helburua: Laser mozketa. Entrega gaia: Laser makinan egin beharreko doiketak eta pausoak zehazten dituen dokumentua. Olaten aurkezpena.
4.Lan-paketea	Helburua: Karakterizazioa. Entrega gaia: Karakterizazio txostena.	
	Azpipaketea:	Helburua: Geruza erresistentzia. Entrega gaia: Egindako neurketen taularen dokumentazioa.
	Azpipaketea:	Helburua: Bizitza- denbora.

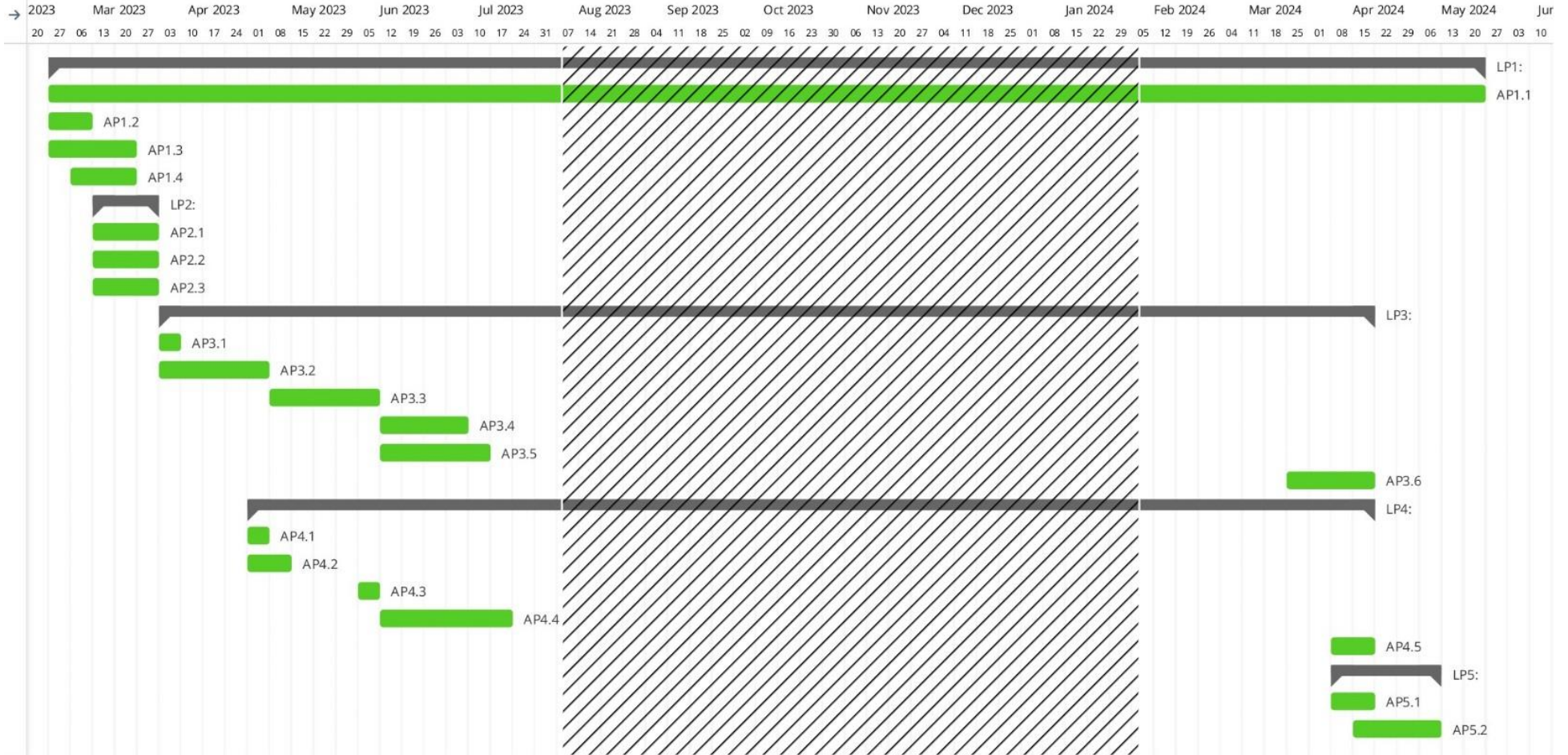
		Entrega gaia: Makinaren azalpenaren bilera eta jarraitu beharreko pausoen txostena.
	Azpipaketea:	Helburua: Elipsometroa. Entrega gaia: Makina erabiltzeko azalpenak eta emaitzen interpretazioa erakusten duen txostena.
	Azpipaketea:	Helburua: Mikroskopia. Entrega gaia: Makinaren erabileraren azalpena eta mozketa eta isolamenduaren emaitzen aurkezpena.
5.Lan-paketea	Helburua: Proiektuaren ondorioak eta analisisia. Entrega gaia: Ondorioen eta analisisien txostena.	
	Azpipaketea:	Helburua: Proiektua aurrera eramateko aurrekontua. Entrega gaia: Aurrekontuaren txostena
	Azpipaketea:	Helburua: Lortu diren emaitzetatik ondorioak atera. Entrega gaia: Ondorioen txostena.

10.2 Gantt diagrama

Atal honetan, lan osoaren plangintza adierazten da Gantt diagrama baten bitartez. Lan paketeak eta azpipaketeak azaltzen dira, ataza bakoitza burutzeko behar izan den denbora adierazita. Diagraman ikusten den bezala 2023ko abuztutik 2024ko otsaila arte etenaldi bat egin da. Beraz, proiektua burutzeko behar izan den denbora 8 hilabetekoa izan da. Hurrengo taulan agertzen diren lan pakete eta azpipakete bakoitzari kode bat eman zaio, Gantt diagraman pakete bakoitza adierazteko.

19. Taula. Lan-pakete eta azpipakete bakoitzaren iraupena.

Lan-paketea	Azpipaketea	Iraupena (egunak)
LP1: Lanaren gaia finkatu eta dokumentuaren formatua zehaztu.	AP1.1: Dokumentazioa.	270
	AP1.2: Helburuak definitu.	10
	AP1.3: Zereginak definitu.	21
	AP1.4: Beharrezko baliabideak definitu.	18
LP2: Hasierako azterketa egin.	AP2.1: Geruza bakoitzaren teknikak zehaztu.	14
	AP2.2: Geruzen diseinua.	14
	AP2.3: Makinen aukeraketa.	14
LP3: Fabrikazioa.	AP3.1: Garbiketa.	4
	AP3.2: Difusio eta oxidazioa (I).	25
	AP3.3: Fotolitografia.	25
	AP3.4: Laser isolamendua.	25
	AP3.5: Laser mozketa.	31
	AP3.6: Difusio eta oxidazioa (II).	25
LP4: Karakterizazioa.	AP4.1: Lau puntako zunda.	5
	AP4.2: Bizitza-denbora.	7
	AP4.3: Elipsometroa (I).	5
	AP4.4: Mikroskopia.	36
	AP4.5: Elipsometroa (II).	9
LP5: Proiektuaren ondorioak.	AP5.1: Proiektua aurrera eramateko aurrekontua.	11
	AP5.2: Emaitzen ondorioak atera.	25



55. Irudia. Gantt diagrama.

11. Alderdi ekonomikoak

Proiektuaren kostuen azterketa funtsezko elementua da proiektuaren bideragarritasunerako eta kudeaketa eraginkorrerako. Atal honek garapen teknikoari eta proiektuaren hedapenari lotutako kostuen banaketa zehatza eskaintzen du.

Proiektuaren kostuak hiru kategoría nagusietan banatzen dira:

Barne orduak: Osagai honek kontuan hartzen ditu lan taldeko kideek proiektua garatu eta gauzatzeko prozesuan emandako orduak. Barne hartzen ditu giza baliabideen esleipena eta proposatutako irtenbidea ezartzearekin zuzenean lotutako beste edozein jarduera.

Amortizazioak: Proiektuan berez erabilitako aktibo finkoak sartzen dira hemen. Hauek izan daitezke: ekipoa, software lizentziak, azpiegitura teknologikoa eta proiektua arrakastaz gauzaten laguntzen duten eta bitzita baliagarri zehatza duten beste baliabide batzuk.

Gastuak: Kategoría honetan sartzen dira proiektua burutzeko behar diren baliabide kontsumigarriekin edo kanpoko zerbitzuekin lotutako kostuak. Besteak beste, materialak, hirugarrenen zerbitzuak, bidai kostuak. Gastuek proiektuan erabilitako baliabideak adierazten dituzte, aktibo finkotzat hartzen ez direnak eta etorkizuneko proiektuetarako berrerabili ezin direnak.

Osagai hauek azterketa sakona eginez gero, behar diren baliabideen ebaluazio zehatza egin ahal izango da, eta proiektu honetarako aurrekontu errealista eta eraginkorra egiteko lagunduko du.

11.1 Barne orduak

20. Taula. Barne orduak.

Izena	Ordu kopurua	Kostua €/orduko	Kostu totala (€)
Junior ingeniaria	600	20	12000
Laborategiko teknikaria	300	40	12000
Zuzendaria	30	50	1500
		Guztira	23500

11.2 Amortizazioak

Atal honetan, erabili diren makinena taula azaltzen da. Makinak urte askotan zehar erabili direnez, bakoitzaren gastua amortizatutzat jotzen da.

21. Taula. Amortizazioak.

Izena	Unitate kopurua	Gastua
Microsoft Office lizentzia	1	Amortizatuta
Ordenagailua	1	Amortizatuta
Erauzketa kanpaia	3	Amortizatuta
Labea	2	Amortizatuta
Bizitza-denbora ekipoa	1	Amortizatuta
Lodiera neurtzeko makina	1	Amortizatuta
Fotolitografia argi makina	1	Amortizatuta
Erretxina espinerra	1	Amortizatuta
Elipsometroa	1	Amortizatuta
Laser makina	1	Amortizatuta
OLS 500 Olympus	1	Amortizatuta
	Guztira	Amortizatuta

11.3 Gastuak

22. Taula. Produktu kimikoen aurrekontua.

Izena	Kostua (€/l)
NaOH	100
HF	100
NH3	15
H2O2	10
HCL	20
<i>Microposit 1818 G2 positive</i>	100
<i>Microposit MF- 319 developer</i>	50
Azetona	10
IPA	10
Guztira	415 €

23. Taula. Gas botilen aurrekontua.

Izena	Kostua	Kostua olatak fabrikatzeko (€)
O2	0,80 EUR/m ³	320
N2	0,20 EUR/m ³	160
POCL3	2,50 EUR/kg	50
Guztira		530

24. Taula. Gastuak.

Izena	Kostu totala (€)
Bulego materiala	15
Internetarako konexioa	100
Gas botilak	530
Silizio olatak	120
Produktu kimikoak	415
Guztira	1180 €

11.4 Aurrekontu totala

Azken taula honetan kontuan hartzen dira aurreko tauletan erakusten diren gastuen laburpena eta guztira proiektua gauzatzeko behar izan den gastu totala.

25. Taula. Aurrekontu totala.

Izena	Kostu totala (€)
Barne orduak	23500
Amortizazioak	Amortizatuta
Gastuak	1180
Guztira	26680 €

Hau da, proiektu hau aurrera eraman ahal izateko, hogeitasei mila seiehun eta laurogehi euro behar izan dira.

12. Ondorioak

Dokumentu honetan, perovskita- tandem zeluletarako siliziozko egituren fabrikazioa eta karakterizazioa aztertu eta optimizatu da. Ondorio atalean, proiektuaren helburu zientifikoak eta emaitza nagusiak laburbiltzen dira, baita ondorio pertsonalak ere.

Tandem zelulen fabrikazioa burutzeko, olaten garbiketa, difusioa eta oxidazioa, fotolitografia eta laser isolamendua eta mozketak egin dira. Prozesu bakoitzaren emaitza egokia bermatzeko, karakterizazio prozesu batzuk jarraitu dira, geruza erresistentziaren neurketa, bizitza-denbora, elipsometroaren bitartez geruzen neurketa eta azkenik mikroskopiaaren bidezko azterketa, isolamenduaren eta mozketaren prozesuen kalitatea egiaztatzeko.

Prozesuen azterketak erakutsi du fabrikazio teknikak doitu eta optimizatzeak egitura efizienteagoak sortzea ahalbidetzen duela. Hala ere, aztertu da fabrikazio prozesuak erronkak dakartzala. Prozesu bat prest izateko denbora behar da, labe batek tenperatura egonkortu arte zenbat itxaron behar den kontuan hartuta. Olaten hauskortasuna dela eta, arreta handiz manipulatu behar dira. Gainera, laborategiko aretoan sartzean, arropa espezifikoak jantzi behar da, eta babes neurriak hartu. Honek guztiak prozesua zaildu eta moteltzen du, baina era berean esperientzia baliotsua eskaintzen du teknikak eta metodologiak sakonki ulertzeko.

Ondorio pertsonalei dagokienez, proiektua burutzeko siliziozko egituren fabrikazio prozesu osoaren ikuspegi sakona emateaz gain, teknika ezberdinen erabileraren garrantzia azpimarratu nahiko nuke. Garatutako metodologiak eta erabilitako tresneria ezagutzeak esperientzia praktikoa baliotsua eskainiz.

Azkenik, proiektu hau burutzeko laguntza ezinbestekoa izan den laborategiko teknikariari, Vanesa Fano, eskerrak eman nahi dizkiot. Prozesu guztien azalpenak eskaini eta proiektua burutzeko beharrezkoak izan diren kontzeptuak azaldu dizkit. Bere aholkularitza eta lan bikainari esker, proiektuaren helburuak lortu dira.

13. Erreferentziak

- [1] R. E. d. España, «Balance de energía,» REData, [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/balance>. [Atzitze-data: Ekaina 2024].
- [2] N. R. E. Laboratory, «Best Research-Cell Efficiency Chart,» Photovoltaic Research, [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. [Atzitze-data: Otsaila 2024].
- [3] M. Y. L. y. C. B. H. S. P. Bremner, «Analysis of tandem solar cell efficiencies under {AM1.5G} spectrum using a rapid flux calculation method,» *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, %1. bol.vol. 16, p. pp. 225–233, 2008.
- [4] G. Vasco, «2030 Agenda: Garapen Jasangarria / Desarrollo Sostenible,» País Vasco, España.
- [5] A. R. G. y. D. V. G. Fernando Rodríguez Mas, «Apuntes sobre la energía fotovoltaica,» [Online]. [Atzitze-data: Martxoia 2024].
- [6] M. M. W. G. y. R. C. S. Wenham, «The Characteristics of Sunlight,» in *Applied Photovoltaics*, London, Earthscan, 2007, pp. pp. 3-30.
- [7] A. S. S. Power. [Online]. Available: <https://www.azurspace.com/>. [Atzitze-data: Martxoia 2024].
- [8] M. Y. L. C. B. H. S. P. Bremner, «Progress in Photovoltaics: Research and Applications,» %1. bol.16, p. 225, 2008.
- [9] «SOLAR SPECTRUM CALCULATOR,» [Online]. Available: <https://www2.pvlighthouse.com.au/calculators/solar%20spectrum%20calculator/solar%20spectrum%20calculator.aspx>. [Atzitze-data: Ekaina 2024].
- [10] A. S. C. D. E. V.-S. C. M. F. Meillaud, «Efficiency limits for single-junction and tandem,» ScienceDirect, Neuchatel, 2006.
- [11] *. Y. D. W. L. Q. H. Y.-B. C. a. U. B. Niraj N. Lal, «Perovskite Tandem Solar Cells,» *Analytica Science*, 2017.
- [12] B. L. W. A. e. a. Werner J, «Efficient near-infrared-transparent perovskite solar cells enabling direct comparison of 4-terminal and monolithic perovskite/Silicon tandem cells.,» *ACS Energy Letters*, %1. bol.1, p. 474–480, 2016.
- [13] G. J. D. A. e. a. Werner J, «Parasitic absorption reduction in metal oxide-based transparent electrodes: application in perovskite solar cells.,» *ACS Applied Materials & Interfaces*, %1. bol.8, p. 17260–17267, 2016.

- [14] J. Z. Y. Z. A. N. Q. S. S. H. C. H. S. K. L. Z. Z. S. K. S. A. B. D. C. S. Zhiwei Ren, «Strategies for high performance perovskite/crystalline silicon four-terminal tandem solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, %1. bol.179, p. 36–44, 2018.
- [15] D. P. G. K. D. M.-K. I. & U. A. Stanujkic, «An Integrated Simple Weighted Sum Product Method—WISP,» *IEEE Transactions on Engineering Management*, %1. bol.70, %1 zk.5, p. 1933, 2023.
- [16] J. H. G. B. G. Schubert, Artist, *Metallization Trends for cell manufacturing*. [Art]. Photon's 4th PV Production Equipment Conference, Munich, marzo de 2009..
- [17] S. H. J. W. P. A. K. Agarwal, «Thermal Oxidation of Silicon Carbide (SiC),» *Materials Science Forum*, %1 / %2 bol.vol. 338-342, pp. pp. 899-902, 2000.
- [18] R. F. Pierret, «Semiconductor Device Fundamentals,» Addison-Wesley, 1996.
- [19] H. J. Levinson, «Principles of Lithography,» SPIE Press, Bellingham, WA, 2010.
- [20] «Fotolitografía en la fabricación de semiconductores,» in *Documento técnico sobre fotolitografía*.
- [21] D. S. J. H. K. K. J. S. Kim, «Electrical and Optical Properties of ITO Thin Films,» *Journal of Applied Physics*, %1. bol.86, %1 zk.11, pp. pp. 6451-6456, 1999.
- [22] G. U. S. D. A. W. H. S. Jäger, «Indium Tin Oxide (ITO) Interlayer as an Adhesion Promoter,» in *Sensors and Actuators B: Chemical*, Elsevier, 2015, p. 35.
- [23] J. C. L. Y. T. S. F. F. R. H. e. a. Q. Ye, «Highly-stable four-point-probe metrology in implant and epitaxy processes,» IEEE, 2014.
- [24] N. M. B. R. M. A. Azzam, «Ellipsometry and Polarized Light,» Elsevier Science, 1987.
- [25] S. M. S. y. K. K. Ng, «Physics of Semiconductor Devices,» John Wiley & Sons, 2007.
- [26] M. Y. L. C. B. H. S. P. Bremner, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, %1. bol.16, p. 225, 2008.

Eranskina: SiO₂-aren kolore-karta

