



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

**Laser ultralabur baten bidezko
urrezko estaldura meheen
ablazioa**

*Lorea Armendariz, Ainara Rodriguez,
Aldara Pan, Oihane Beldarrain
eta Gabriel Alejandro López*

161-168 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.05.21>



Laser ultralabur baten bidezko urrezko estaldura meheen ablazioa

Armendariz, L.^{1,2}; Rodríguez, A.^{1,3}; Pan, A.^{1,3};

Beldarrain, O.^{1,3} eta López, G.A.²

¹ CEIT - Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Manuel Lardiazabal 15, 20018 Donostia/San Sebastian.

² Fisika Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea, UPV/EHU, Sarriena Auzoa s/n, 48940 Leioa, Bizkaia.

³ Tecnun, Universidad de Navarra, Manuel Lardiazabal 13, 20018 Donostia/San Sebastian.

larmendarizm@ceit.es

Laburpena

Fluentzia-ataria garrantzi handiko parametroa da laser bidezko ablazio prozesuetan. Izan ere, honen determinazioa ezinbestekoa da egitura nanometrikoen fabrikazioa optimizatzeke. Lan honetan, laser ultralabur baten bidez pulsu kopuru desberdinak irradiatuz 300 nm-ko lodiera duen urrezko geruza mehe baten fluentzia-ataria aztertu da. Era berean, materialaren ezaugarri den inkubazio-faktorea lortu da, laserraren erradioaren estimazioa egitearekin batera. Bestalde, geruzaren dimentsioak fluentzia-atarian duen eragina aztertu da, fluentzia-ataria lodierarekiko duen joera behatuz. Azkenik, kromoz eta urrez osaturiko geruza bikoitza ikertu eta alde zuzenetik urrezko geruzaren kasuan lortutako emaitzekin erkatu da.

Hitz gakoak: Laser ultralaburra, Fluentzia-ataria, Urrea, Estaldura mehea.

Abstract

Fluence threshold is an important parameter in laser ablation processes. In fact, its determination is essential to optimize the fabrication of submicrometric structures in materials. In this work, the fluence threshold of a 300-nm gold thin film was studied by applying different number of pulses through ultrafast laser irradiation. In addition, the incubation factor characteristic of the material was obtained and an estimation of the spot radius was made. Moreover, the effect of layer thickness on the fluence threshold has been analyzed. Finally, double layers composed by chromium and gold layers were studied and compared with the previously obtained results for the gold film.

Keywords: Ultrafast laser, Fluence threshold, Gold, Thin film.

1. Sarrera eta motibazioa

Laserren erabilerak, garapenak eta ikerkuntzak hazkuntza esponentziala jasan du azken hamarkadetan. Izan ere, 1980 urtetik aurrera, gero eta ikerketa eta aurrerapen gehiago burutu dira laserren esparruan. Halaber, teknologia berrien aurrerapenarekin batera, metalezko estaldura meheen erabilera handitu da industria, medikuntza eta biologia bezalako sektoreetan (Zhou *et al.*, (2020)).

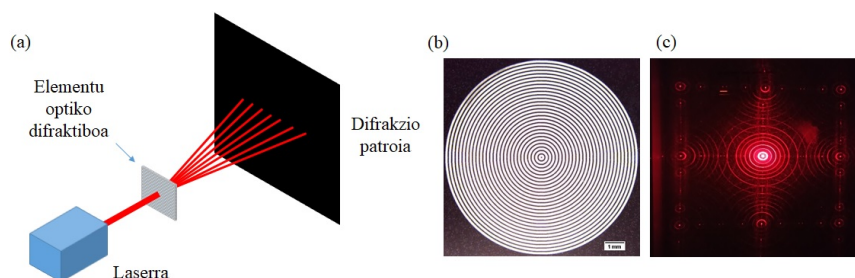
Geruza meheetan ablazio-prozesuak burutzerako orduan laserren teknologia erabiltzen da. Laser ultralaburak femtosegunduko (10^{-15} s) ordeneko iraupena duten pulsuak igortzen dituzten laserrak dira. Azken urteotan egin-dako ikerketetan ikusitako abantailen ondorioz, hauen erabilera suspertu da (Chichkov *et al.*, (1996); Furusawa *et al.*, (1999)). Bero hedapenaren gutxitzearekin batera, energiaren deposizio-denbora laburrari esker, kaltetutako eremuaren bolumena txikiagotzen da, prozesu garbiagoak lortuz (Jia eta Zhao, (2019)). Modu honetan, bereizmen nanometrikoa bermatzen da, laser izpiaren uhin-luzeraren azpiko zehaztasuna lortzen delarik. Hortaz, laser ultralaburrek, aipatutako aurrerapenak direla bide, prozesuen kalitatea optimizatzea lortu dute.

Ablazioa, laserraren irradiazioaren bidez ematen den solido baten gainazaleko materialaren eransketa prozesuari deritzo. Laser batekin metalaren gainazala irradiatzean, erradiazioaren energia xurgatzearen ondorioz elektroito askeak kitzikatzen dira tenperatura altuak lortuz. Elektroito-azpisistemaren erlaxazioa, ioi sareari transmitituriko energiaren bitartez gertatzen da, energia-trukea elektroitoen eta fonioen arteko akoplamenduaren bitartekoa izanik. Azkenik, energiaren birbanaketa berri bat ezartzen da, non atomoen loturak apurtzen diren materialaren hedapena

eraginez. Talka-uhinaren ondorioz, gainazaletik materiala erazten da krater bat sortuz (Rethfeld *et al.*, (2017)).

Geruza meheen ablazioaren aplikazioetako bat, difrakzio elementu optikoen (*Diffractive optical elements*) ekoizpena da. Gailu hauek laser izpia birmoldatzeko erabiltzen dira. Izan ere, metalezko geruzan ekoiztutako patroiek argia partzialki igarotzea ahalbidetzen dute (ikus 1 irudia) eta difrakzio fenomenoaren ondorioz intentsitatearen distribuzio berri bat lortzen da. Estaldura meheen ablazioaren bidez, elementu optiko hauen ekoizpena modu erraz, merke eta azkar batean egitea ahalbidetzen da, orain arte erabilitako prozesu-kimiko konplexuagoak ordezkatzeko aukera hobe izanik.

1. irudia: (a) Difrakzio elementu optikoen erabileraren eskema. (b) Ablazio bidez ekoizturiko elementu optikoen irudia. (c) Hau erabilitakoan lortzen den izpiaren distribuzioa.



Ablazio-prozesuak burutzerako orduan, fluentzia-ataria deritzon energia jakin bat behar da ablazioari hasiera emateko. Parametro hau metalaren propietate optikoen eta termodinamikoen araberakoa da, hortaz, honen azterketa funtsezko erronka da ablazio-prozesuak kontrolatzeko eta hobetzeko orduan (Zhou *et al.*, (2020)).

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Azken urteotan hainbat ikerketa burutu dira urrezko pelikula meheen inguruan, era berean maiz kalkulatu dira fluentzia-ataria eta inkubazio-faktorea (Ni *et al.*, (2006); Gdde *et al.*, (1998)). Beste argitalpen batzuetan ere estalduraren lodierak fluentzia-atarian duen eragina aztertu da (Krger *et al.*, (2007); Kern *et al.*, (2011)), dena dela ez da teoriarik bilatu portaera hori azaltzeko, ez baitute joera argi bat antzeman. Bestalde, geruza anitzeko egiturek propietate mekaniko, termiko eta elektriko hobeak erakusten dituztenez (Qiu *et al.*, (1994)), hauen ikerketak garrantzi handia hartu du aplikazioetan ekar dezakeen hobekuntzak direla eta.

Era berean, ikuspuntu teoriko batetik ablazio-prozesua beste hainbatetan aztertu da. Bi temperaturan eredu klasikoak (TTM) fenomeno hau deskribatzen du, non elektroien eta ioien artean desoreka termodinamikoan onartzen den. Bi ekuazioz osatutako eredua, elementu finituen metodoan oinarritzen den simulazio bidez aztertu da hainbatetan (Kim *et al.*, (2020)).

Lan honetan pultsuen esperimentuaren bidez 300 nm-ko lodiera duen urre geruza baten fluentzia-ataria eta inkubazio-faktorea kalkulatu dira. Bestalde, lodiera desberdinak (50 nm - 420 nm) eta geruza bikoitzak dituzten laginetarako analisi bera errepikatu da behatzen diren efektuak aztertzeko asmoz. Hauek dira lortu nahi diren helburu nagusiak:

- Urrearen ablazio-prozesurako parametro-tartea aurkitzea eta optimizatzea, mikroegitura garbiak lortzeko.
- Geruzaren lodierak fluentzia-atarian izan ditzakeen efektuak aztertzeko eta joera bat bilatzea.
- Substratuaren eta estalduraren artean kromo-geruza bat gehitzeak duen eragina aurreko emaitzekin erkatzea.

3. Ikerketaren muina

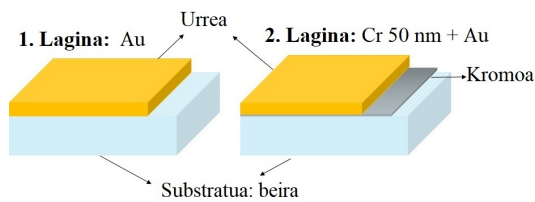
3.1. Konfigurazio esperimentalak

Ikerketan erabilitako laginak urrearen eta beiraren arteko konbinazioak izan dira (ikus 2. irudia). Substratu bezala 1 mm-ko lodiera duen borosilikatozko beira erabili da, non ihintadura katodiko (*magnetron sputtering*) bitartez urrezko pelikula meheak metatu diren. Hauen dimentsioak prozesuaren denboraren bitartez kontrolatu dira 50-420 nm bitarteko lodiera duten sei lagin lortuz. Bestalde, estaldura anitzeko beste bi lagin sortu dira: beirazko

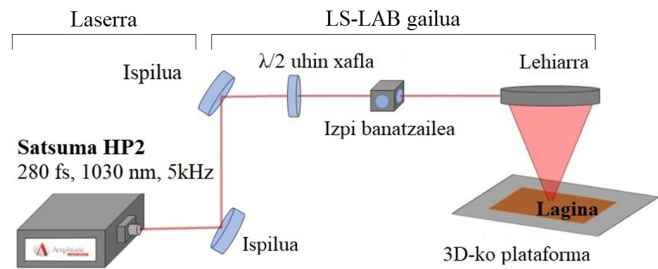
substratuan 50 nm-ko kromozko geruza bat eta honen gainean 250 nm-ko eta 350 nm-ko lodiera duten urrezko pelikulak. Era honetan, guztira 300 nm-ko eta 400 nm-ko pelikula anitzak ekoiztu dira. Lodieren karakterizazioa perfilometro mekaniko baten bitartez burutu da.

Iterbio zuntz laserra (Satsuma Amplitude HP²) erabili da 280 fs-ko iraupena duten linealki polarizatutako pultsuak sortzeko. Uhin xafla batez, izpi banatzaile batez eta lehiar batez osatutako LASEA markako LS-LAB eredu sistema optikoak, laser izpiaren parametroak eraldatu eta laser-prozesuak bideratzen ditu (ikus 3. irudia). Konfigurazio optiko guztia KYLA izeneko programa baten bitartez kontrolatu da, zeinak laser izpiaren parametroak finkatzea eta egiturak diseinatzea ahalbidetzen duen. 1030 nm-ko uhin-luzera zentrala duen erradiazioa igorri da 5 KHz-ko maiztasuna finkatuz. Era honetan, 20 μJ -ko pultsuko energia eta 5 J/cm^2 -ko fluentsia maximoa lortu dira. Laser izpiak $M^2 = 1.10$ -ko kalitate faktorea eta $\varnothing_0 = 30 \mu\text{m}$ -ko diametroa ditu. Praktika esperimental guztiak baldintza normaletan eta giro tenperaturan burutu dira.

2. irudia: Fabrikaturiko laginen egitura.



3. irudia: Konfigurazio optikoaren diagrama.



Laginen karakterizazioa JEOL FEG-SEM (*Scanning Electron Microscope*) ekortze mikroskopia elektronikoaren bidez eta Oxford Instruments EDX (*Energy Dispersive X-ray spectroscopy*) analisiaren bitartez egin da. Sortutako kraterren diametroak Gwyddion izeneko irudien analisisiko programarekin neurtu dira.

3.2. Pultsu bakar eta anitzeko saiakerak

Liu autoreak, 1982an, fluentsia-ataria kalkulatzeko metodo bat argiratu zuen lehen aldiz bere lanean. Laser izpiaren fluentsiak honako distribuzio Gaussiarra jarraitzen du,

$$F(r) = F_0 e^{-2r^2/w_0^2} \quad F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2} \quad (1)$$

non w_0 izpiaren erradiora, r koordenatu erradiala eta E_p izpiak pultsuko duen energia diren. Laserrari finkatzen zaion F_0 distribuzio Gaussiarraren fluentsia maximoa da. Alde batetik, pultsuko energia aldatuz joan da 0.1 μJ eta 20 μJ bitartean 0 – 5 J/cm^2 -ko fluentsiak lortuz. Bestalde, irradiazio-denbora finkatzen duen *burst time* izeneko parametro baten bidez pultsu kopurua kontrolatu da. Maiztasuna 5 KHz-tan ezarritik, $t_b = N/f$ ekuazioaren arabera, 200 μs eta 22000 μs tarteko denborekin, 1 eta 100 bitarteko pultsu kopuruak lortu dira. D diametroko krater baten ablazioa eragiteko fluentsia minimoa fluentsia-ataria (F_{th}) izanik, ondorengo ekuazioa betetzen da,

$$D^2 = 2w_0 \ln\left(\frac{F_0}{F_{th}}\right) \quad (2)$$

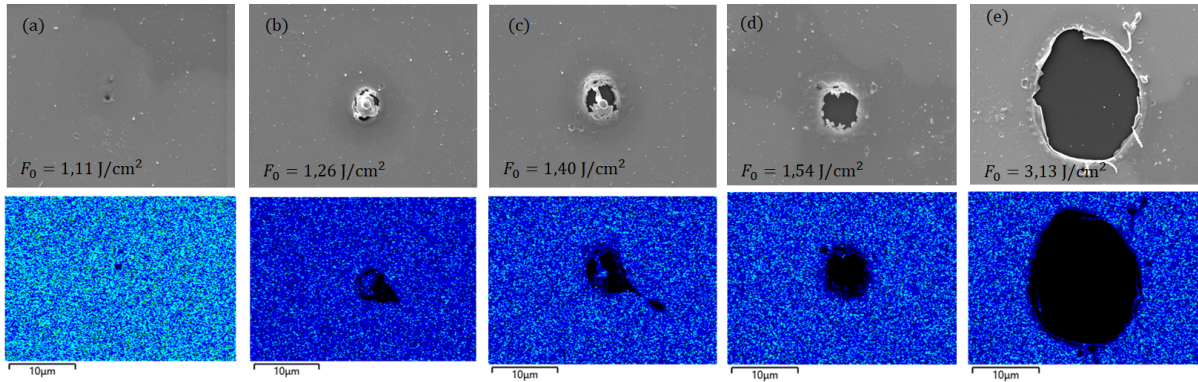
$D^2 - \ln F_0$ grafika semilogaritmikoa irudikatuz gero eta $D^2 = 0$ estropolazioa eginez, fluentsia-ataria lortu da kasu bakoitzerako. Era berean, izpiaren erradiora kalkulatu da zuzenaren maldatik. Kraterak guztiz zirkularrak ez direnez, bi norabideetan egin da analisisia, ondoren batezbesteko bat kalkulatu.

$$D_i^2 = 2w_{0,i} \ln F_0 - 2w_{0,i} F_{th,i} \quad i = x, y \quad (3)$$

Fluentsia-ataria kalkulatzeko prozedura honi, diametro karratuaren metodoa deritzo. Azaldutako prozedura jarraituz, 300 nm-ko estaldura duen urrezko lagin baten ablazio-prozesua aztertu da.

Prozesuaren bilakaera 4. irudian ikusten da, non pultsu bakarrarekin hainbat fluentsiatara egindako zuloak adierazten diren. 4. irudiko goiko irudietan, ekortze-bidezko mikroskopia elektronikoaz egindako argazkiak azaltzen dira. Behekoetan aldiz, EDX bidezko laginaren konposizio kimikoaren irudiak daude, non kolore urdina urreri dagokion eta beltza aldiz beirari.

4. irudia: SEM eta EDX bidez lortutako pultsu bakarreko ablazio-prozesuen irudiak fluentzia ezberdinetera 300 nm-ko urrezko estalduaren kasuan.



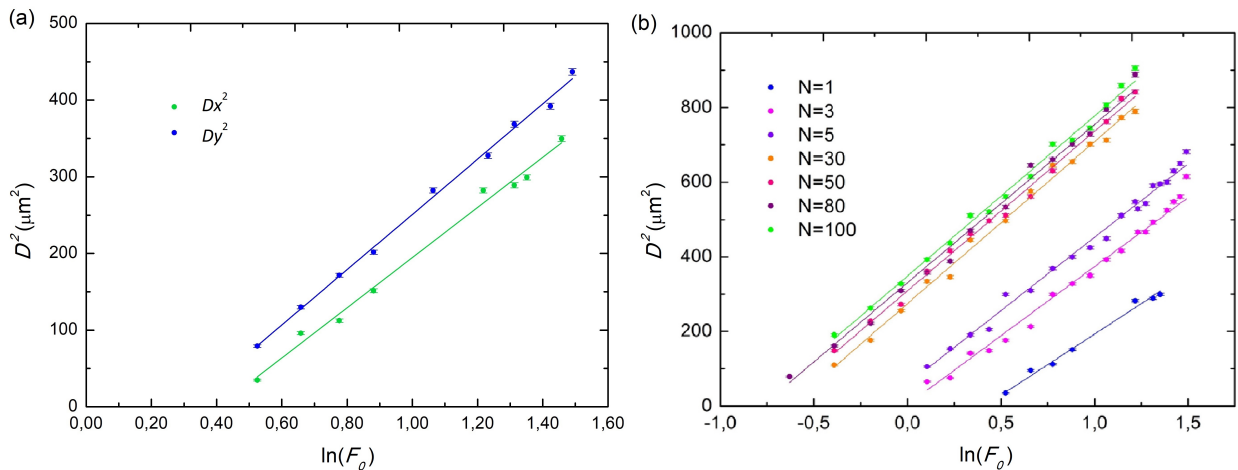
4.a. irudian urrezko gainazalak erradiazioa xurgatu duen arren, ez da aldaketarik nabarmentzen. Izan ere, ez da ablazio-prozesuari hasiera emateko adina energia ezarri. Fluentzia igo ahala, 4.b. eta c irudietan estalduaren baztertze ahul bat antzeman daiteke, hala ere, oraindik ez dago zulo garbirik. $F_0 = 1.54 \text{ J/cm}^2$ ko baliora iristean (ikus 4.d. irudia), lehenengo aldiz estaldura guztiz kendu da azpiko substratua agerian utziz. Hortaz, fluentzia-atariaren balioa 1.11 J/cm^2 eta 1.54 J/cm^2 bitartekoa izango dela ondorioztatu da. Azkenik, 4. irudia bere osotasunean aztertuz, fluentziaren igoerarekin batera, sortutako kraterren diametroak handitzen direla ikusten da.

Irudi hauek aztertuz eta diametro guztiak neurtuz, 5.a. irudiko emaitzak lortu dira pultsu bakararen kasurako. Fluentzia-atariantzako $F_{th_1}(1) = (1.50 \pm 0.04) \text{ J/cm}^2$ eta $F_{th_2}(1) = (1.35 \pm 0.02) \text{ J/cm}^2$ balioak lortu dira. Hortaz, bien arteko batezbestekoa kalkulatu $F_{th}(1) = (1.43 \pm 0.04) \text{ J/cm}^2$ balioa lortu da. Lortutako emaitza bat dator 4. irudian aurreikusitakoarekin.

Laser izpiaren erradioari dagokionez, erregresioaren maldatik, $w_{0_x} = (12.8 \pm 0.2) \mu\text{m}$ eta $w_{0_y} = (13.4 \pm 0.1) \mu\text{m}$ balioak kalkulatu dira eta era berean, $w_0 = (13.1 \pm 0.2) \mu\text{m}$ -ko batezbesteko erradioa lortu da.

Prozesu berdina errepikatuz, 5.b. irudiko datuak erabiliz pulsu kopuru bakoitzeko fluentzia-ataria eta izpiaren erradioa kalkulatu dira. Ikus daiteke, zuzenen maldak antzekoak direla kasu guztietan, erradioa berdina baita. Bestalde, fluentzia-ataria, zuzenak ordenatu ardatzarekin duen ebakidura puntuak determinatzen duena, pulsu kopurua handitu ahala gero eta txikiagoa da.

5. irudia: Neurtutako diametroen datuak eta hauen erregresio linealak (a) Pulsu baterako (b) Pulsu anitzetarako.



3.3. Inkubazio-faktorea

Inkubazio-ereduaren arabera (Jee *et al.*, (1988)), fluentzia-ataria pultsu kopuruaren arabera da. $F_{th}(N)$, N pultsuren fluentzia-ataria izanik, ondorengo erlazioa betetzen da,

$$F_{th}(N) = F_{th}(1)N^{\xi-1} \quad (4)$$

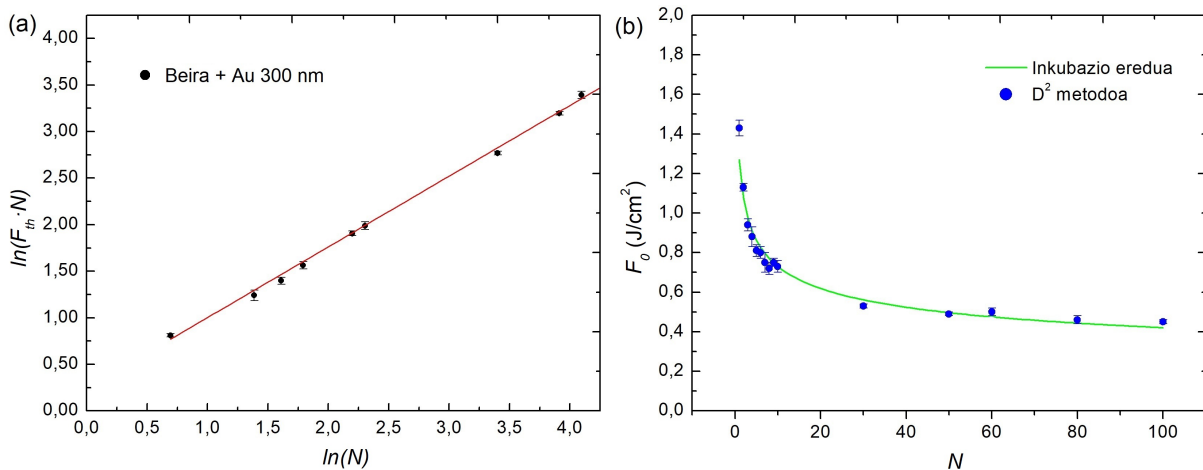
Ekuazio honetan agertzen den ξ -ri inkubazio-faktorea deritzo. Faktore honek, materialari eragindako kalte-metaketa adierazten du. Metalen kasurako, $\xi = 0.7 - 0.9$ bitarteko inkubazio-faktoreak lortu dira (Kern *et al.*, (2011)). Pulsu kopuruarekin batera, materialaren deformazioak eransketari laguntzen dio.

Inkubazio-faktorea eta pulsu bakarreko fluentzia-ataria kalkulatzeko, 4 ekuazioa ondoko eran adierazten da.

$$\ln(F_{th}(N) \cdot N) = \ln F_{th}(1) + \xi \ln N \quad (5)$$

6.a. irudian, lortutako emaitzak adierazi dira 5 ekuazioa jarraituz. Maldatik, $\xi = 0.76 \pm 0.01$ balioa determinatu da urrearen inkubazio-faktorearentzat. Balio hau aurrez egindako esperimenduekin bat dator, izan ere, Ni *et al.* autoreek 2006. urtean egindako ikerketan 0.765 balioko inkubazio-faktorea lortu zuten.

6. irudia: (a) Pulsu kopuru bakoitzeko lortutako fluentzia-atariak eta hauen erregresio lineala. (b) Lortutako emaitzen konparazioa inkubazio-ereduarekiko.



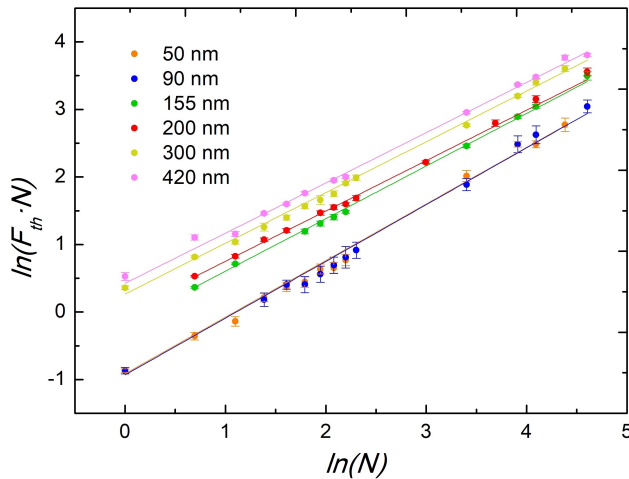
Bestalde, 6.a. irudian oinarrituz pulsu bakarreko fluentzia-ataria kalkula daiteke, non kasu honetan $F_{th}(1) = (1.27 \pm 0.04) \text{ J/cm}^2$ -ko balioa den. Arestian 3.2 atalean lortutako emaitzarekin erkatuz, balio txikiagoa lortu da kasu honetan. Hala ere, 4. irudiari erreparaturaz, azken balio hau aurreikusitako tartean kokatzen da.

6.b. irudian, alde batetik 4 ekuazioa jarraitzen duen kurba irudikatu da $F_{th}(1) = 1.27 \text{ J/cm}^2$ eta $\xi = 0.76$ emaitzetan oinarrituz. Bestalde, diametro karratuaren metodoa erabiliz 3 ekuazioarekin lortutako emaitzak adierazi dira. Halaber, baliozkotasuna aztertzeke helburuz, bi metodoen arteko errore erlatiboa kalkulatu da. Pulsu bakarreko kasuan, inkubazio-faktorearen teoria % 12an urruntzen da D^2 metodoaren bitartez kalkulaturako balioetik. Pulsu bakarra aplikatzean, sortutako kraterrak irregulartasun handiagoa erakusten dute, hortaz kontuan hartu ez ditugun neurketa erroreak egon daitezke desbideraketa honen atzean. Hala ere, pulsu kopurua igo ahala, errorea jaisten da % 0 - % 7 balioen artean mantenduz, zeina onargarritzat har daitekeen. Beraz, esan dezakegu bi metodoak baliagarriak direla fluentzia-atariak kalkulatzeko.

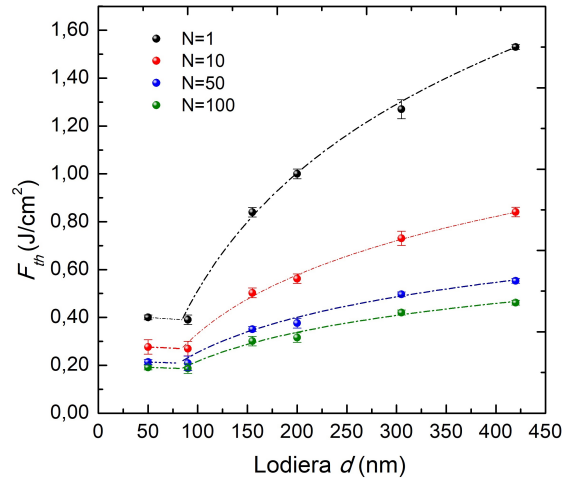
3.4. Estalduraren lodieraren eragina

Atal honetan, 50-420 nm bitarteko lodierak dituzten sei lagin aztertu dira aurreko ataleko prozedura berdina jarraituz. Era berean, 7. irudiko emaitzak lortu dira 3.3 ataleko inkubazio-eredua jarraituz. Ikus dezakegun bezala, zuzenen malda antzerakoa da kasu guztietarako, ondorioz esan dezakegu inkubazio-faktorea ez dela estalduraren lodieraren arabera. Batez besteko balioa kalkulatu $\xi = 0.78 \pm 0.02$ balioa lortu da.

7. irudia: 50 eta 420 nm bitarteko lodiera duten laginen datuak eta erregresio linealak.



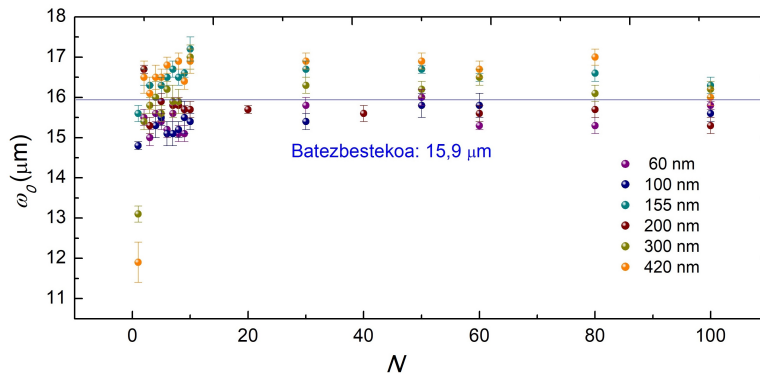
8. irudia: Geruzaren lodieraren arabera kalkulaturiko fluentsia-atariak 1, 10, 50 eta 100 pulsturentzat.



Bestalde, geruza lodiagoek fluentsia-atari handiagoa dute meheek baino. 8. irudian lodieraren arabera emaitzak adierazi dira 1, 10, 50 eta 100 pulstu kopuruentzat. Kasu guztietan, 100 nm ingurutik beherako estaldurretan, fluentsia-ataria konstante mantentzen da. 100 nm baino handiagoak diren pelikuletan aldiz, fluentsia-ataria lodierarekin batera igotzen da. Igoera motelagoa da gero eta pulstu gehiago aplikatuz, fluentsia-ataria tarte txikiago batean kontzentratzen baita. Azken fenomeno hau aurrez aldetik aipatutako inkubazio-teoriaren ondorioa da.

Azkenik, pulstu kopuru eta lodiera desberdinekin lortutako laser izpiaren erradioaren balioak 9. irudian adierazten dira. Batezbestekoa kalkulaturik, $w_0 = (15.9 \pm 0.2) \mu\text{m}$ balioa lortu da. Balio hau pulstu bakarreko kasuan kalkulaturikoa ($w_0 = (13.1 \pm 0.2) \mu\text{m}$) baino hobea da. Izan ere, aurreko atalean ondorioztatu den bezala, pulstu bakarreko kasuan emaitzen zehaztasuna ez da hain ona, errore erlatiboa handiagoa da eta.

9. irudia: Izpiaren erradioarentzat lortutako emaitza guztiak eta hauen batezbestekoa.



3.5. Geruza anitza: kromoa eta urrea

Ikerketaren azken zatian, urrea eta beiraren artean kromo-geruza bat gehitzeak ablazioan duen eragina aztertu da. Honetarako, bi lagin aztertu dira: beira substratu gisa, 50 nm kromo eta 250 nm eta 350 nm-ko lodiera duen urrezko geruza konposatua, non 300 eta 400 nm-ko lodiera osoak lortu diren, hurrenez hurren.

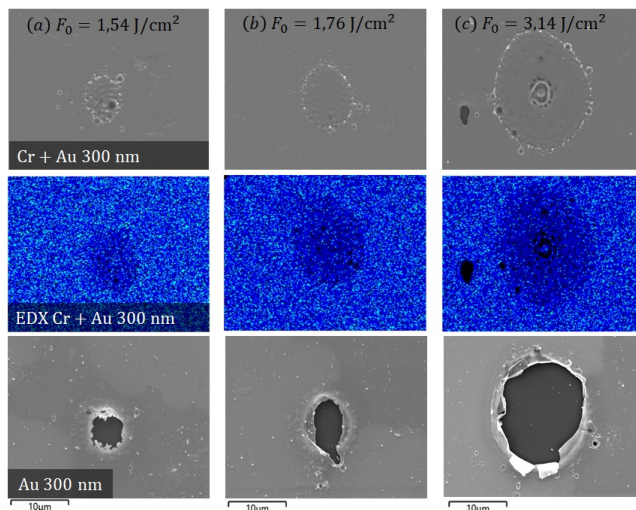
Bi lagin hauen kasurako aurreko ataletan jarraitutako metodologia berdina errepikatu da. 300 nm-ko estaldura duen laginaren ablazio-prozesua 10. irudian erakusten da. Goiko lerroko irudietan mikroskopia elektroniko bidez egindako irudiak agertzen dira geruza bikoitzaren kasurako. Erdiko lerroan, lagin berdinen konposizioaren analisi-mapa agertzen da. Beheko irudietan aldiz, soilik urrea duen laginaren irudiak daude fluentsia berdinetan.

Urrezko laginak ablazio-prozesuari hasiera ematen dionean, $F_0 = 1.54 \text{ J/cm}^2$ izanik (ikus 10.a. irudia), ez da ablaziorik antzematen geruza bikoitzaren kasuan. Hala ere, urrearen urtzeari dagokion metalaren gainazaleko aldaketa bat nabarmentzen da. Finkatutako potentzia igo ahala, urrutako eremua handituz doa $F_0 = 3.14 \text{ J/cm}^2$ baliora heldu arte, non 10.c. irudian, lehenengo aldiz ablazio-fenomenoa antzematen den. Dena den, ablazioa jasan duen eremua oso txikia da beste laginaren eremuarekin erkatuz gero. Irudia osotasunean aztertuz, kromo geruza bat ezartzean metalaren fluentzia-ataria igotzen dela ondorioztatu da.

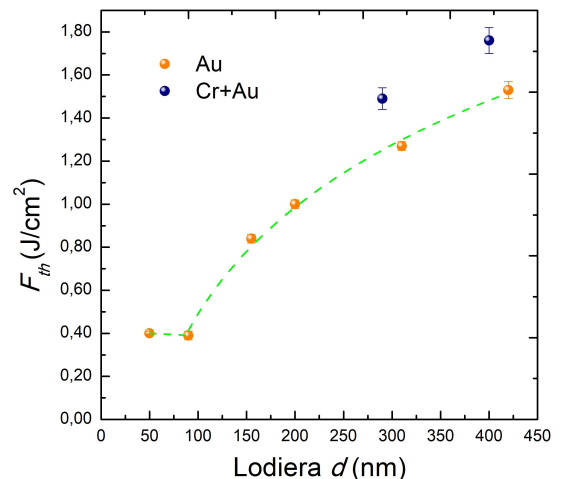
Kasu honetan, 0.77 ± 0.01 eta 0.73 ± 0.01 -ko inkubazio-faktoreak eta $(1.49 \pm 0.05) \text{ J/cm}^2$ eta $(1.76 \pm 0.06) \text{ J/cm}^2$ -ko fluentzia-atariak lortu dira 300 eta 400 nm-ko geruza anitzeko laginen kasuan, hurrenez hurren. Emaiza hauek 11. irudian adierazi dira aurretik urrezko laginaren kasurako lortutako emaitzekin batera.

11. irudia aztertuz, alde batetik, pelikularen lodierarekin batera fluentzia-atariaren igoera antzematen da 100 nm baino gehiagoko estaldurentzat. 100 nm baino gutxiagoko estalduretan, ataria konstante mantentzen da. Izan ere, hainbat lanetan frogatu den bezala (Hohlfeld *et al.*, (1997)), elektroioak oztopo gabe higitzen dira ingurunearen luzera elektroien luzera balistikoa baino txikiagoa den kasuetan. Literaturan frogatu da luzera hori 100 nm ingurukoa dela. Izan ere, lodiera txikiagotan modu homogeneoan sakabanatzen dira elektroioak, energia homogeneoki banatuz ingurune osoan zehar. Distantzia handietan aldiz, gero eta gehiago kostatzen zaie elektroiei ingurunea berotzea, hortaz erradiazio gehiago behar izango da ablazio-prozesuari hasiera emateko.

10. irudia: SEM eta EDX bidez lortutako pultsu bakarrek ablazio-prozesuen irudiak bi laginentzat.



11. irudia: Geruzaren lodieraren arabera kalkulaturiko fluentzia-atariak pultsu bakarra aplikatuz bi laginen kasurako.



Bestetik, 11. irudiko geruza bikoitzaren kasuan, fluentzia-atariaren igoera behatu da aztertutako bi lodiera ezberdinetarako. Igoera hau akoplamendu konstanteari dagokio, kromoak urreak baino akoplamendu konstante bortitzagoa baitu ($G(\text{Au}) = 2.65 \cdot 10^{16} \text{ Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$ eta $G(\text{Cr}) = 4.2 \cdot 10^{17} \text{ Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$) (Qiu *et al.*, (1994)). Hortaz, berotutako elektroioak bi materialen arteko mugara heltzean, kromoak lehenago pasako du energia bere sarera, energia gehiago xahutuz. Ondorioz, urrearen sarera energia gutxiago helduko da, gehiago kostatuko zaio ablazio-prozesurako behar duen energia lortzea, eta era berean, ataria igoko da.

4. Ondorioak

Lan honetan urrezko geruza meheen fluentzia-ataria aztertu eta kalkulatu da. Honekin batera materialaren inkubazio-faktorea eta laser izpiaren erradioa zehaztu dira. Era berean, elektroien mugimenduari lotu den geruzaren lodierarekiko portaera joera argi bat behatu da. Geruza mehentzat, fluentzia-ataria konstante mantendu da. Estaldura lodiagotan aldiz, hazkuntza joera erakutsi da, 100 nm-ak bi tarteren arteko muga izanik. Azkenik, kromo geruza bat gehitzearen eragina ikertu da fluentzia-atari altuagoak lortuz aztertu diren kasuetarako. Emaiza hau onuragarria izan daiteke hainbat aplikaziorako, irradiazioarekiko erresistentzia handiagoa erakusten duten materialak ekoizteko besteak beste. Ildo beretik, geruza anitzek propietate hobekak eskaini dezaketela aurreikusita da. Lan

honetan, edozein materialetan aplikaturiko ablazio-prozesuak optimizatzeke metodologia bat diseinatu eta frogatu da. Beraz, ikerketa berdina aplikatu daiteke interesatzen den materiala prozesatzeko parametroak finkatzeko.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Behin pultsu estatikoen fluentsia-atariak kalkulatu, difrakzio elementu optikoen ekoizpenerako patroiak sortzeko oinarria finkatu da. Emaitza hauek abiapuntutzat hartuz, modu dinamikoan egindako prozesuen parametroak finkatu daitezke. Izan ere, laserraren ekortze-abiadura puntu batean jausten den pultsu kopuruarekin erlazionatuz, prozesuan kontuan hartu beharreko fluentsia-ataria estimatu daiteke. Laserraren modu dinamikoaren bitartez, hainbat patroi egituratu daitezke, lerro simple batetik hasiz, nahi adina egitura konplexu diseinatzeraino. Hortaz, lerroetan eta gainazaletan zehar ablazioa lortzeko prozesua optimizatzea da hurrengo urratsa. Behin hori lortuta, difrakzio elementu optikoetan nahi den diseinua egituratzeko erabil behar diren parametroak finkatuta egongo direlarik.

6. Erreferentziak

- Chichkov, B.N., C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben, eta A. Tünnermann. (1996). Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 63.109–115.
- Furusawa, K., K. Takahashi, H. Kumagai, K. Midorikawa, eta M. Obara. (1999). Ablation characteristics of au, ag, and cu metals using a femtosecond ti:sapphire laser. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 69.S359–S366.
- Güdde, J., J. Hohlfeld, J.G. Müller, eta E. Matthias. (1998). Damage threshold dependence on electron–phonon coupling in au and ni films. *Applied Surface Science* 127-129.40–45.
- Hohlfeld, J., J. Müller, S.-S. Wellershoff, eta E. Matthias. (1997). Time-resolved thermorefectivity of thin gold films and its dependence on film thickness. *Applied Physics B-lasers and Optics* 64.387–390.
- Jee, Y., M.F. Becker, eta R.M. Walser. (1988). Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces. *J. Opt. Soc. Am. B* 5.648–659.
- Jia, X., eta X. Zhao. (2019). Numerical study of material decomposition in ultrafast laser interaction with metals. *Applied Surface Science* 463.781–790.
- Kern, C., M. Zuerch, J. Petschulat, T. Pertsch, B. Kley, T. Käsebier, U. Hübner, eta C. Spielmann. (2011). Comparison of femtosecond laser-induced damage on unstructured vs. nano-structured au-targets. *Applied Physics A* 104.15–21.
- Kim, B., H.K. Nam, S. Watanabe, S. Park, Y. Kim, Y.-J. Kim, K.i Fushinobu, eta S.-W. Kim. (2020). Selective laser ablation of metal thin films using ultrashort pulses. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* .
- Krüger, J., D. Dufft, R. Koter, eta A. Hertwig. (2007). Femtosecond laser-induced damage of gold films. *Applied Surface Science* 253.7815–7819.
- Liu, J.M. (1982). Simple technique for measurements of pulsed gaussian-beam spot sizes. *Opt. Lett.* 7.196–198.
- Ni, X., C. Wang, L. Yang, J. Li, L. Chai, W. Jia, R. Zhang, eta Z. Zhang. (2006). Parametric study on femtosecond laser pulse ablation of au films. *Applied Surface Science* 253.1616–1619.
- Qiu, T.Q., T. Juhasz, C. Suarez, W.E. Bron, eta C.L. Tien. (1994). Femtosecond laser heating of multi-layer metals-ii. experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 37.2799–2808.
- Rethfeld, B., D.S. Ivanov, M.E. Garcia, eta S.I. Anisimov. (2017). Modelling ultrafast laser ablation. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50.193001.
- Zhou, S., K. Zhao, eta H. Shen. (2020). Ablation of gold film on different substrates by ultrafast laser. *Optics Laser Technology* 132.106495.