

RESEARCH ON INTERFEROMETRY OPTO-MECHANICAL SYSTEMS

OPREA Ștefan

Facultatea: FIIR, Specializarea: IAI, Anul de studii: IV, e-mail: opreastef97@gmail.com

Conducător științific: Conf. dr. ing. **Elena LĂCĂTUȘ**

ABSTRACT: This paper is about a generalist view on optical interferometers and their applications in many measurements and determinations. Interferometry is a well known method for measuring perturbations in waves, refractive index of materials and for very precise measurements of displacements. Starting from double-slit experiment of Thomas Young and explaining the phenomenon of interference, then we can establish the principles of optical interferometry with examples like Michelson interferometer and Mach Zehnder interferometer on measurements of refractive index of a gas and plasma, therefore we describe a simple fringe counting algorithm to determine refractive index of a gas.

CUVINTE CHEIE: Interferență, Interferogramă, Interferometru, Indice de refracție.

1. Introducere

Un sistem opto-mecanic de diagnoză interferometrică, numit și interferometru, reprezintă un instrument foarte precis de măsurare a distanțelor, de determinare a indicelui de refracție a unei substanțe sau material, a densității unui gaz, de testare a elementelor optice, măsuratori topografice etc. Măsurătorile realizate de acest sistem se bazează pe modelele de interferență (interferența este fenomenul fizic ce descrie suprapunerea a două sau mai multe unde deplasându-se în același mediu) a două unde optice coerente, provenite din aceeași sursă, aceste modele fiind denumite și interferograme (Fig. 1). Acestea se formează datorită interferenței constructive și distructive, fenomene descoperite de fizicianul Thomas Young în experimentul cu două fante (Fig. 3). În acest experiment, fizicianul Thomas Young (1773-1829) a demonstrat fenomenul de interferență optică cu ajutorul unor panouri cu o fantă, respectiv două fante, în modul următor: o sursă generează o rază de lumină monocromatică (având o singură lungime de undă) ce trece printr-o fantă a unui panou P1, după raza emergentă trece printr-un panou P2 cu două fante. Razele luminoase, ce provin din cele două fante se propagă pe un ecran E, astfel creându-se un model cu franje de interferență.[1][2][3]

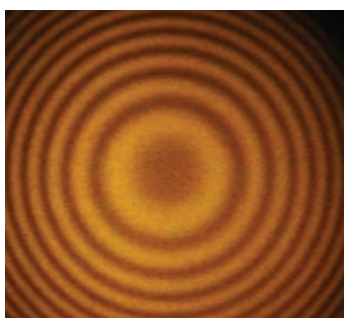


Fig.1 Interferogramă [1]

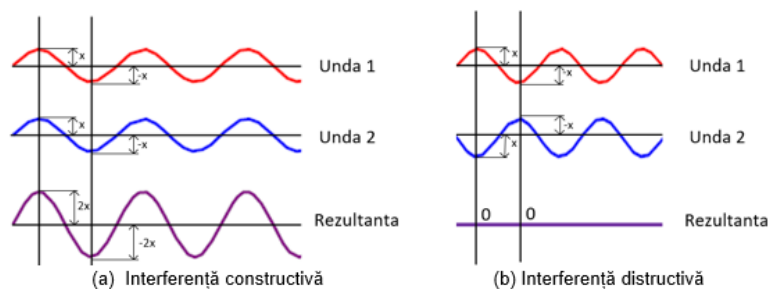


Fig.2 Interferență constructivă și distructivă

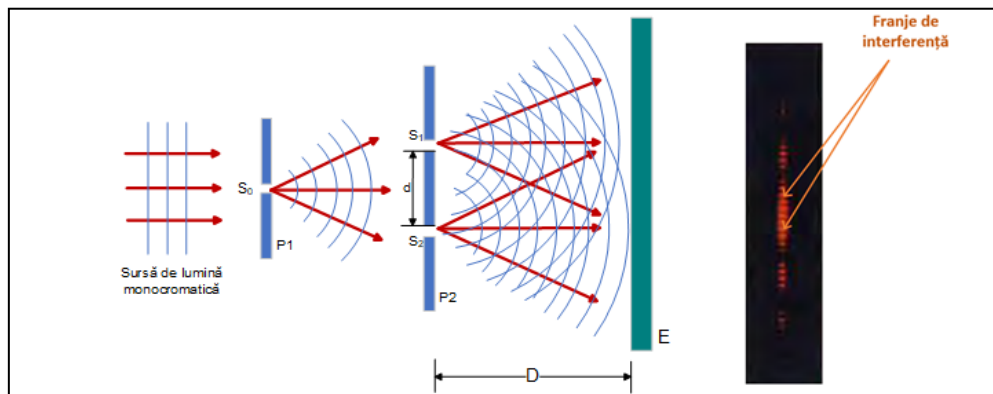


Fig. 3 Experimentul lui Thomas Young cu două fante de interferență S1 și S2

2. Stadiul actual al interferometrelor

În prezent, interferometrele cele mai folosite în măsurătorile experimentale sunt cele bazate pe interferometrele create de fizicienii Michelson, Mach, Zehnder și Normaski. Aplicațiile acestora variază de la măsurarea cu o precizie nanometrică a distanțelor până la măsurarea peturbărilor provocate de undele gravitaționale provenite din spațiul cosmic (cum ar fi interferometrul LIGO, "Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory", bazat pe interferometrul Michelson, Fig. 4) [4]. De asemenea, interferometria reprezintă una dintre cele mai bune variante de diagnosticare a plasmelor (determinarea indicelui de refracție și diferenței de fază pentru măsurarea densității medii a electronilor), deoarece în multe cazuri nu este indicat să se utilizeze sonde solide pentru a determina parametrii interni ai plasmelor, așa că se folosesc niște metode non-perturbatoare pentru diagnosticarea acestora, cum ar fi determinarea indicelui de refracție (Fig. 4). [5][6]

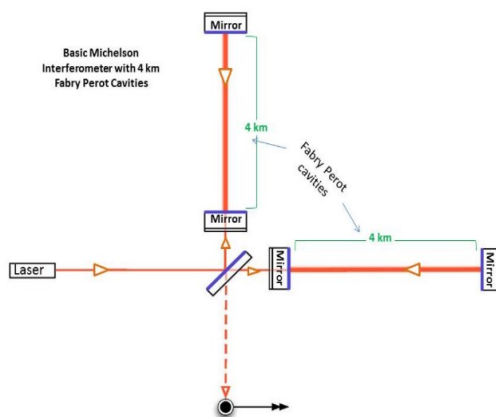


Fig. 4 Interferometru LIGO [4]

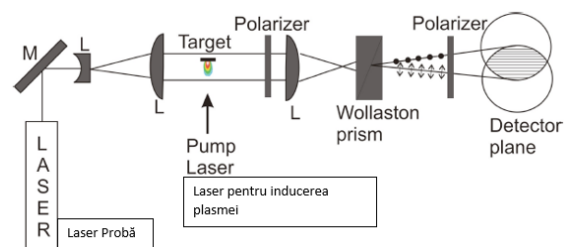


Fig. 5 Interferometru Normaski pentru diagnoza plasmelor [6]

3. Principiul de funcționare al interferometrelor

3.1 Determinarea indicelui de refracție al unui gaz [1]

În Figura 6 se prezintă configurația unui interferometru bazat pe cel utilizat de fizicianul Albert A. Michelson în anul 1887, în experimentul Michelson-Morley, acest sistem interferometric se compune dintr-un laser, un separator de fascicul (BS), două oglinzi (O_1 și O_2), un recipient cu gaz și un detector (CCD). Interferograma se obține în felul următor: un fascicul laser se împarte în două pulsuri într-un separator de fascicul, unul de referință și unul de probă (cel ce trece prin recipientul cu gaz), pulsurile obținute se reflectă

fiecare în două oglinzi, iar la întoarcere se intersectează în separatorul de fascicul, rezultând într-un puls de contopire și crearea fenomenului de interferență, preluat de un detector și afișat ca o interferogramă, unde franjele de interferență sunt reprezentate în forme circulare. Având în vedere faptul că pulsul de referință și pulsul de probă provin din aceeași sursă (laser-ul), acestea au unde coerente și pot să interfereze.

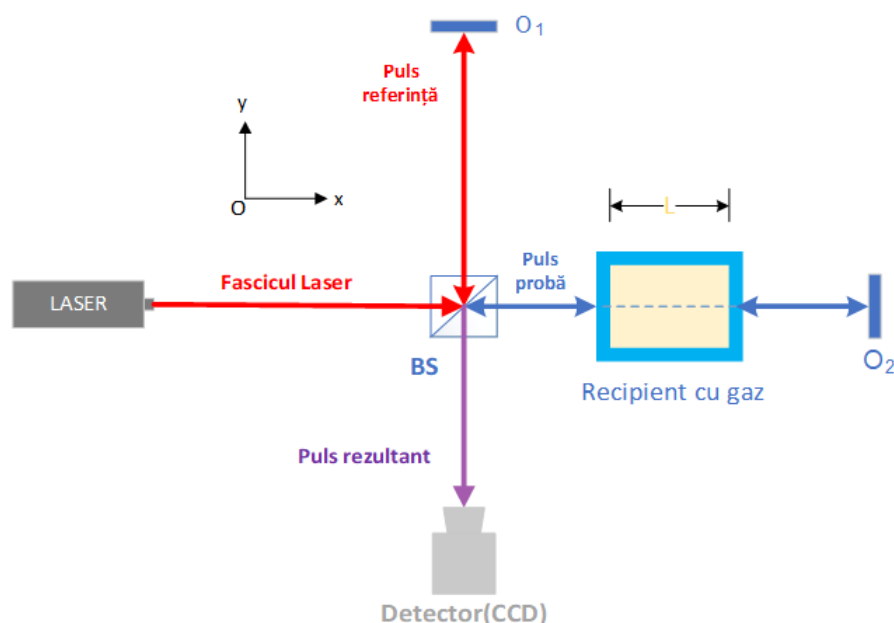


Fig. 6 Interferometrul Michelson pentru determinarea indicelui de refracție al unui gaz

Cu acest interferometru se dorește determinarea indicelui de refracție al gazului din recipient prin numărarea franjelor detectate de camera CCD. Dacă L reprezintă lungimea recipientului cu gaz, pe măsură ce recipientul se umple cu gaz, se numără un număr m de franje de interferență, știind lungimea de undă a laserului se poate afla indicele de refracție al gazului, deci se procedează în felul următor: dacă numărul franjelor m reprezintă diferența numărului lungimilor de undă (N_0) din recipient atunci când acesta este gol (vidat) și numărul lungimilor de undă când acesta este plin cu gaz (N_g), atunci lungimea de undă din recipientul cu gaz (λ_g), este mai scurt cu un factor de n (indicele de refracție), față de lungimea de undă din vid.

Pulsul de probă parcurge o distanță L , înainte de reflexie și încă o distanță L după aceasta, deci parcurge o distanță totală în mediul gazos de $T = 2L$, atunci când recipientul este gol numărul de lungimi de undă este:

$$N_0 = \frac{T}{\lambda_0} = \frac{2L}{\lambda_0}, \text{ unde } \lambda_0 \text{ reprezintă lungimea de undă din vid} \quad (1)$$

Lungimea de undă într-un orice alt mediu decât cel din vid este $\lambda = \lambda_0 / n$, atunci numărul de lungimi de undă din recipientul cu gaz este:

$$N_g = \frac{T}{2\lambda_g} = \frac{2L}{\lambda_0/n}, \text{ unde } \lambda_g \text{ reprezintă lungimea de undă din recipientul cu gaz} \quad (2)$$

Numărul franjelor de interferență m , este diferența dintre numărul lungimilor de undă N_0 și N_g

$$m = N_g - N_0, \text{ din rel. 1 și 2 rezultă că } m = \frac{2L}{\lambda_0/n} - \frac{2L}{\lambda_0} = \frac{2L}{\lambda_0} (n_g - 1), \text{ rezultă că} \quad (3)$$

$$n_g = 1 + m \left(\frac{\lambda_0}{2L} \right), \text{ unde } n_g \text{ este indicele de refracție al gazului}$$

3.2 Diagnoza plasmelor prin interferometrie [5][7]

Prin determinarea indicelui de refracție a unui mediu gazos, se poate determina de asemenea indicele de refracție a unui mediu cu plasmă și de aici mai departe se poate determina densitatea plasmelor (mai exact densitatea electronică a plasmelor).

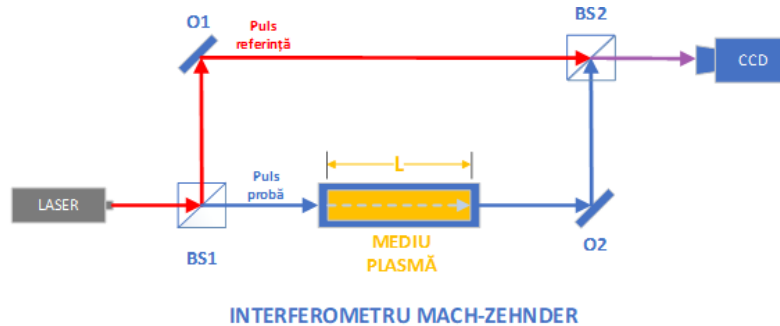


Fig. 7 Interferometrul Mach-Zehnder, folosit pentru determinarea densității unui mediu cu plasmă

Plasma reprezintă un gaz ionizat. Dacă energia este furnizată continuu unui material, temperatura acestuia crește și se realizează trecerea de la solid la lichid la stare gazoasă. Dacă alimentarea cu energie continuă, învelișul atomic existent este rupt și se formează particule încărcate (electroni încărcăți negativ, ioni încărcăți pozitiv și particule neutre), deci acest amestec de particule încărcate electric se numește plasmă sau „a patra stare a materiei”.

În Figura 7, avem configurația unui sistem interferometric Mach-Zehnder, dezvoltat pentru măsurarea densității plasmelor în felul următor: o sursă de lumină laser, două separatoare de fascicul BS₁ și BS₂, două oglinzi O1 și O2 și o cameră ultra-rapidă cu cuplaj de sarcină (CCD). Fascicul laser generat de sursă se împarte cu un raport de 50/50 în primul BS₁, rezultând într-un puls de referință constant în lungime ce se propagă în vid și un puls probă ce se propagă printr-un mediu cu plasmă, la final cele două pulsuri se reîntâlnesc în BS₂ și interferează constructiv și distructiv, rezultând într-o interferogramă, captată de camera video CCD. Pulsul de probă variază în lungime de undă și de asemenea în lungimea propriu-zisă, deoarece indicele de refracție se află într-o strânsă relație cu creșterea și descreșterea densității electronice a plasmelor.

4. Metode de analiză a interferogramelor

În multe experimente cu interferometre pentru determinarea indicelui de refracție a unui gaz, se folosesc configurații experimentale simple cu elemente de reglare preponderent manuale și analiza franjelor se face deseori prin numărarea manuală a acestora. Însă în configurațiile experimentale pentru determinarea indicilor de refracție și densitate pentru gaze nobile sau plasmă induse de un laser ultra-intens cu o putere de 1-10 PW (1PW = 10¹⁵ W), se folosesc algoritmi specializați denumiți „Phase-retrieval” și „Phase unwrapping” (regăsirea fazei sau desfășurarea fazei). Astfel de algoritmi folosesc transformata Fourier pentru a trece din domeniul spațio-temporal în domeniul frecvenței pentru a putea fi extrasă diferența de fază, necesară mai departe pentru determinarea densității gazului sau plasmelor. (Fig. 10) [8][9]

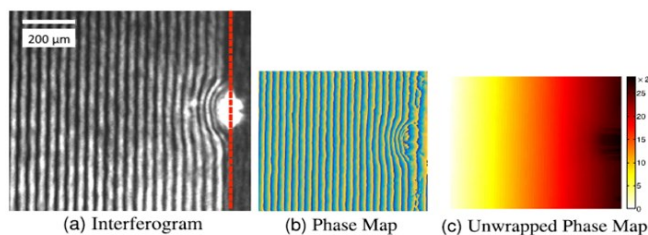


Fig. 8 Interferograma cu o hartă a fazei și o hartă desfășurată a fazei obținută dintr-un algoritim „Phase unwrapping”[9]

5. Program Labview pentru numărarea franjelor

Pornind de la interferometrul Michelson pentru determinarea indicelui de refracție, prin numărarea franjelor, s-a realizat un program cu ajutorul modulului Vision și al aplicației NI Vision Assistant pentru determinarea numărului de franje pentru interferograme circulare. Cu ajutorul funcției IMAQ Resample, interferograma a fost scalată la o rezoluție de 400×400 pixeli, iar apoi s-a aplicat funcția IMAQ Edge Tool pentru trasarea unei regiuni de interes (ROI) liniare pe una din diagonalele imaginii.

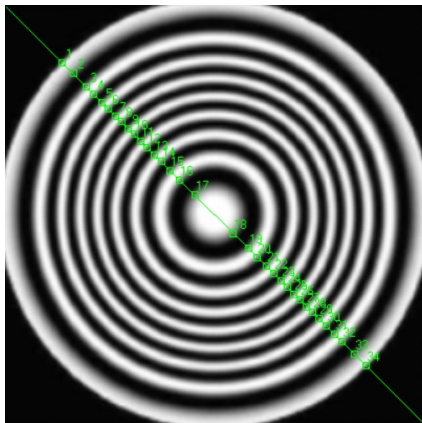


Fig. 9 Regiunea de interes liniară

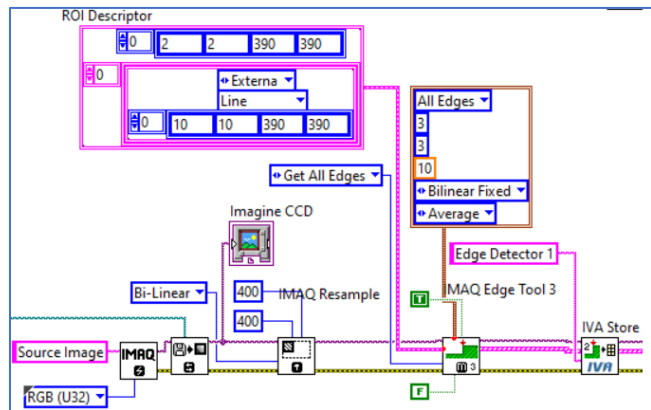


Fig. 10 Diagrama bloc cu parametrii ROI

După realizarea părții programului de numărare franje, s-a aplicat ecuația (3), $n_g = 1 + m \left(\frac{\lambda_0}{2L} \right)$, având ca date de intrare lungimea de undă și distanța L, s-a definit următorul algoritm pentru calcularea indicelui de refracție:

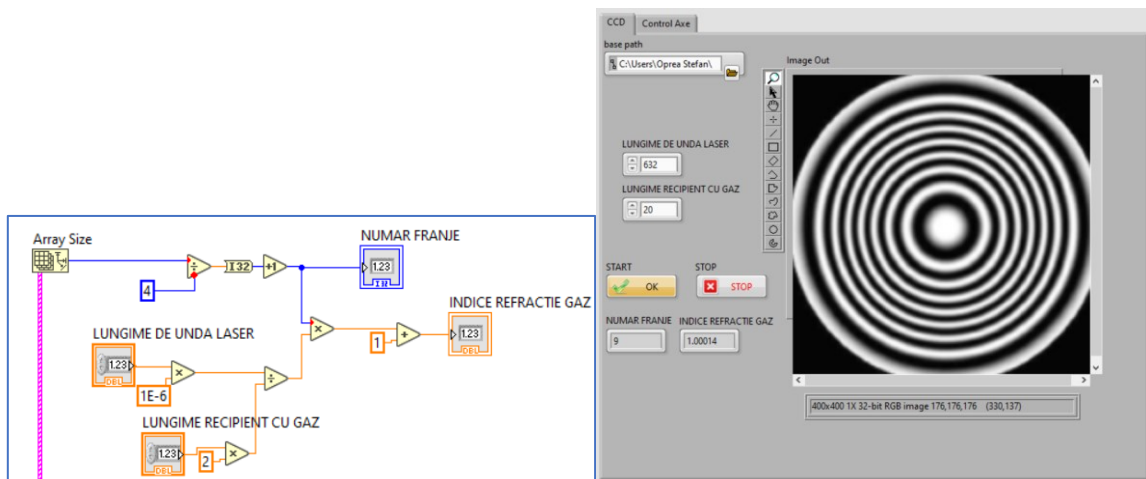


Fig. 11 Diagrama bloc și panoul frontal pentru calcularea indicelui de refracție

6. Concluzii și dezvoltări ulterioare

Deocamdată, în ceea ce privește programul de numărare de franje, acesta se poate folosi doar în cazul interferogramelor circulare statice și de asemenea acestea trebuie să aibă o calitate destul de bună pentru a se putea evita vreo eroare de numărare. La acest program a fost adăugată și o parte de control de axe de translație motorizate pentru un ansamblu realizat în Solidworks, cu elemente standardizate pentru un sistem opto-mecanic în configurație Michelson. Acest lucru s-a realizat prin interfațarea programului CAD Solidworks cu mediul de programare grafică LabVIEW, cu ajutorul modulului "NI Soft Motion". S-

a optat pentru acest lucru deoarece s-a dorit un control în timp real al axelor pentru realizarea simulării de “Motion Analysis” din Solidworks (Fig. 12).

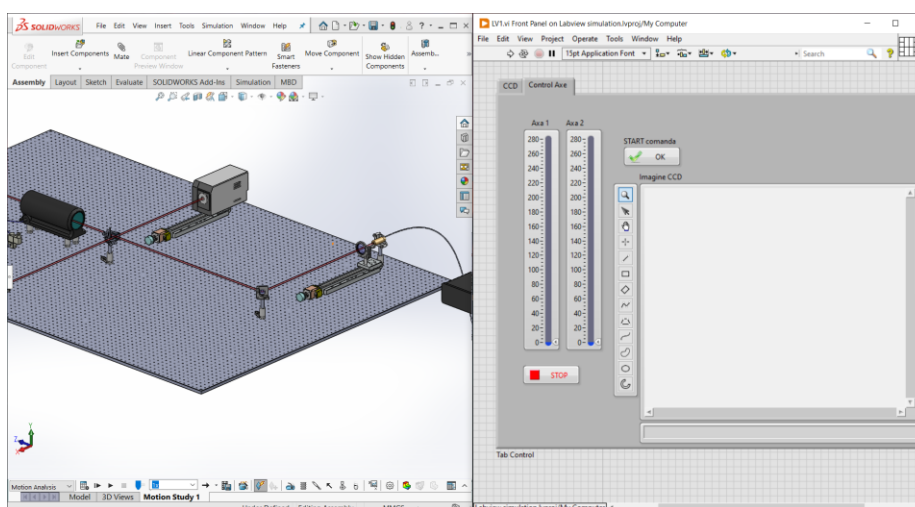


Fig. 12 Programul CAD Solidworks interfațat cu LabVIEW

În ceea ce privesc dezvoltările ulterioare, se dorește realizarea unei aplicații, care să fie capabilă să realizeze comanda și controlul tuturor elementelor dintr-un astfel de sistem opto-mecanic pentru o simulare digitală, dar se dorește de asemenea și pentru simularea unei axe reale, cu un motor pas-cu-pas NEMA 17, cu comandă de la o placă de dezvoltare Arduino împreună cu un driver specific. În partea ce privește analiza interferogramelor, cu ajutorul unor cercetări mai detaliate asupra algoritmilor de “Phase Unwrapping”, se dorește realizarea unui algoritm ce poate extrage diferența de fază dintr-o interferogramă dată pentru a se atinge obiectivul de calculare a densității plasmei sau a unui gaz.

7. Bibliografie

- [1]. S. L. Ling, W. Moebs și J. Sanny (2016), „*University Physics Volume 3*”, Houston, ISBN 978-1-938168-18-5
- [2].*** „*Interference of waves*”, disponibil la: <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/Interference-of-Waves>. [Accesat 05 04 2021]
- [3]. G. Stark, „*Light as a wave, Interference*”, disponibil la: <https://www.britannica.com/science/light> [Accesat 05 04 2021].
- [4].*** „*LIGO Interferometer*” disponibil la: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-ifo?highlight=Michelson> [Accesat 05 04 2021].
- [5]. I. H. Hutchinson (2005), „*Principles of Plasma Diagnostics*”, Cambridge Press, Cambridge ISBN-13 978-0-521-80389-2
- [6]. S. S. Harilal și M. S. Tillack (2004), „*Laser plasma density measurements using interferometry*”, pagini 7-10,
- [7]. R. J. Goldston și P. H. Rutherford (1995) , „*INTRODUCTION TO PLASMA PHYSICS*”, IOP Publishing Ltd 1995, ISBN 0-7503-0325-5
- [8]. J. M. Maciel, F. J. C. Rodriguez, M. M. Gonzalez, F. G. P. Lecona și V. M. D. Ramirez (2017). „*Digital Processing Techniques for Fringe Analysis*”. 10.5772/66474.
- [9]. J. Park, H. A. Baldis și Hui Chen (2016) „*The implementation and data analysis of an interferometer for intense short pulse laser experiments*”, Vol. 4, e26, Davis, California, 7 pagini.