

بررسی تغییرات ضریب شکست میله لیزری نئودیمیم-یاگ با استفاده از روش تداخل سنجی

مینا برادران^۱؛ داوود رزاقی^۱

چکیده در این مقاله با استفاده از تداخل سنج توپمن گرین، فرانژهایی به صورت خطوط موازی تاریک و روشن تشکیل شده است، که با قراردادن میله لیزر در یکی از بازوهای تداخل سنج، این فرانژهای تخت دچار مقداری انحراف می شوند. با نوشتن برنامه ای به زبان مطلب و پردازش تصاویر بدست آمده از فرانژها، اختلاف راه نوری و مقدار بیشینه و جذر میانگین مربعی اعوجاج قله تا دره جبهه موج برای میله های لیزری نئودیمیم-یاگ بدست آمده است. همچنین مقدار تغییرات ضریب شکست برای میله ها بدست آمده است و کیفیت اپتیکی آنها با هم مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: میله لیزری نئودیمیم-یاگ، روش چکرالسکی، اعوجاج جبهه موج، پراکندگی

۱. مقدمه

تداخل سنجی به عنوان روشی قدرتمند برای تست قطعات اپتیکی به کار می رود. از تداخل سنجی در بسیاری از زمینه های دیگر از جمله بررسی ناصافی سطوح، اندازه گیری فرم سطح^۲، شکل سطوح، اندازه گیری ضخامت لایه های نازک و اندازه گیری جابجایی سطوح در حال حرکت نیز استفاده می شود [۱-۴]. تداخل سنجی، همچنین برای تشخیص ناهمگنی قطعات اپتیکی به کار می رود [۵-۶].

اجزای اصلی یک تداخل سنج از یک منبع نور، یک شکافنده باریکه، سطح مرجع و سطح مورد آزمایش تشکیل شده است که شکافنده پرتو، دو نور مرجع و آزمون را از منبع نور بوجود می آورد. وقتی این دو جبهه

موج با هم ترکیب می شوند، فرانژهای تداخلی تشکیل می شوند که معیار تشکیل نواحی تاریک و روشن، تفاوت فاز (به علت اختلاف راه نوری) بین دو نور مرجع و آزمون می باشد. در دستگاههای تداخل سنجی با تجزیه و تحلیل شکل الگوی تداخلی می توان از روی تفاوت راه نوری به کیفیت قطعات اپتیکی پی برد.

یکی از تداخل سنج هایی که برای تست کیفیت قطعات اپتیکی به کار می رود، تداخل سنج Twyman-Green می باشد که ما در این مقاله، برای تعیین کیفیت اپتیکی میله های لیزر نئودیمیم-یاگ از این تداخل سنج استفاده کرده ایم.

این میله های لیزری از بلور یوتریم آلومینیوم گارنت دوپت شده با نئودیمیم (Nd:YAG) استخراج شده اند، که یکی از مشهورترین انواع بلورهای اکسیدی است که به عنوان ماده فعال در لیزرهای حالت جامد به کار می روند.

۱. پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

پرتو به صورت همدوس در صفحه مشاهده به هم می پیوندند. با کج کردن یکی از آینه ها با زاویه α (آینه M_1) می توان شکل نوارهای تداخلی خطی را ایجاد کرد که روی CCD قابل مشاهده است. سپس با قراردادن میله لیزر در یکی از بازوها، به علت عدم یکنواختی ضریب شکست در میله لیزر، که یکی از نقصهای بوجود آمده در مرحله رشد بلور می باشد، اختلاف راه نوری در مسیر نور گذرنده از میله لیزر بوجود می آید و این مساله باعث می شود که این نوارهای تداخلی خطی دچار اعوجاج شوند. هر چه این ناهمگنی در ضریب شکست در میله لیزر بیشتر باشد، میله تولید شده کیفیت بدتری دارد و این اعوجاج بیشتر است. شکل ۲ آرایش اپتیکی استفاده شده را نشان می دهد.



شکل ۲. آرایش اپتیکی

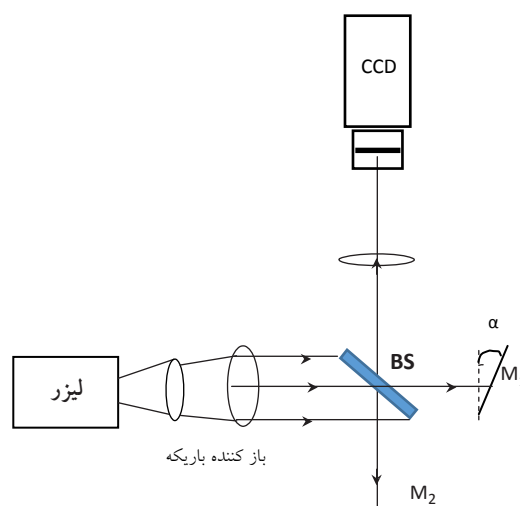
۳. پردازش تصویر

تصویر دریافتی از CCD - $\frac{1}{2}$ اینچ که متعلق به شرکت JVC بوده و دارای تعداد ۴۱۰۰۰۰ پیکسل می باشد - به رایانه رسیده و عملیات پردازش تصویر با استفاده از نرم افزار متلب روی آن انجام شده است. نمونه ای از تصویر گرفته شده در شکل (۱-۳) آمده است: مراحل پردازش تصویر با نوشتن برنامه ای به زبان متلب به صورت زیر انجام شده است [۸]:

این بلورها به عنوان ماده فعال لیزر در زمینه های مختلفی همچون لیزرهای موج پیوسته توان بالا، همچنین لیزرهای پالسی پر توان استفاده می شود. روشهای پراش با اشعه ایکس و نوترون نقش اساسی برای تشخیص نقایص ساختاری بلور ایفا می کنند [۷]. اما این روشها، نیاز به آماده سازی نمونه دارد و برای آماده سازی نمونه در ابعاد مورد نظر، نیاز به تخریب میله مورد مطالعه می باشد. در حالی که تداخل سنجی به عنوان روشی غیر مخرب برای تعیین کیفیت قطعات اپتیکی به کار می رود [۶].

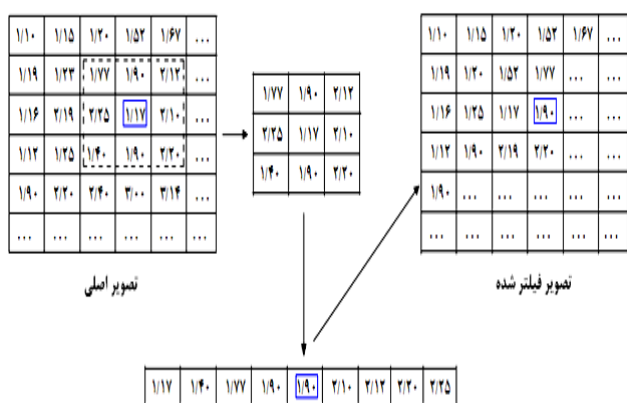
۲. آرایش اپتیکی

آرایش اپتیکی استفاده شده، تداخل سنج توپمن گرین می باشد که بصورت شماتیک در شکل ۱ آمده است.



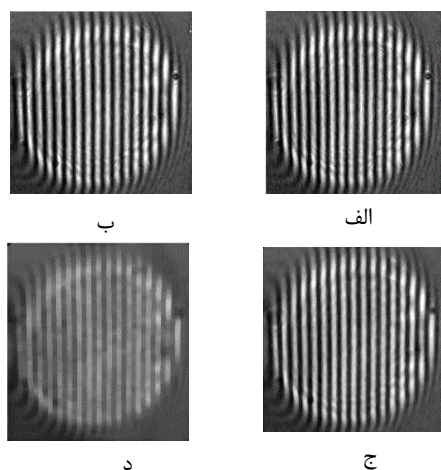
شکل ۱. نمایش شماتیک تداخل سنج Twyman-Green

این تداخل سنج از یک لیزر هلیوم نئون به عنوان منبع نور استفاده می کند که پس از عبور از یک آینه به دهانه ورودی یک باز کننده باریکه می رسد. پرتو لیزر موازی شده به وسیله شکافنده باریکه (BS) به دو قسمت تقسیم می شود. پرتوها راه نوری مساوی از BS را طی می کنند و از آینه M_1 و M_2 انعکاس می یابند. هر دو



شکل ۴. نحوه عملکرد فیلتر میانگین

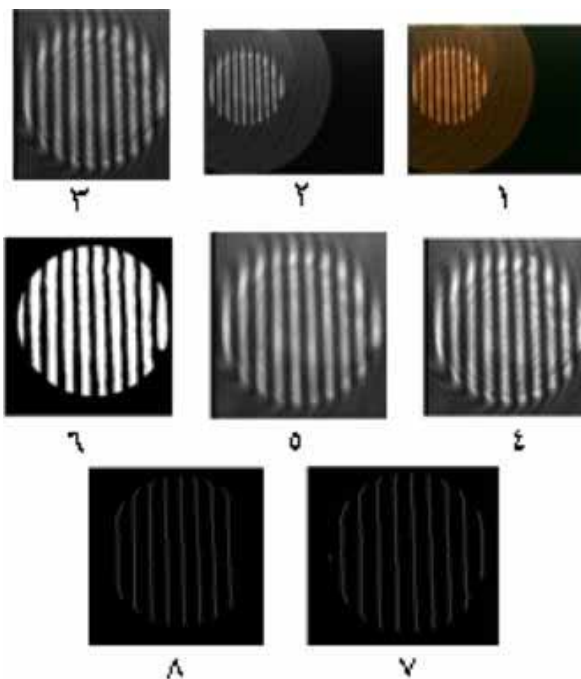
۴- اعمال فیلتر میانگین: در این مرحله با اعمال فیلتر میانگین، نویزهای تصویر را حذف می‌کنیم (شکل ۳-۵).



شکل ۵. اعمال فیلتر میانگین با ابعاد مختلف: الف: تصویر اولیه، ب: ابعاد 3×3 ، ج: ابعاد 7×7 ، د: ابعاد 15×15

فیلتر میانگین از جمله فیلترهای غیر خطی می‌باشد. نحوه عملکرد یک فیلتر میانگین 3×3 در شکل ۴ نشان شده است. هر پیکسل توسط یک ماتریس $n \times n$ احاطه می‌شود. برای مثال در شکل ۴ پیکسلی که در سطر سوم و ستون چهارم از تصویر اصلی قرار دارد، در نظر گرفته شود. عدد تصویر در این مکان $1/17$ می‌باشد. این پیکسل توسط یک ماتریس 3×3 احاطه شده است. اعضای ماتریس احاطه کننده پیکسل مورد نظر از کوچک به بزرگ مرتب سازی می‌شوند. عددی که در

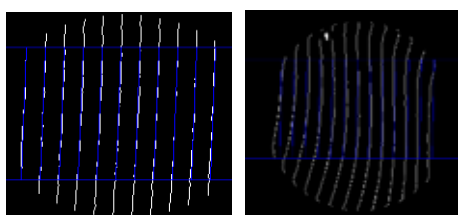
۱- تبدیل تصویر رنگی به تصویر با فرمت سیاه و سفید که در این فرمت به هر پیکسل با توجه به شدت روشنایی آن عددی بین ۰ (سفید) تا ۲۵۵ (سیاه) نسبت می‌دهد (شکل ۳-۲).



شکل ۳. مراحل پردازش تصویر

۲- بریدن تصویر: در این مرحله قسمتی از تصویر را که فقط شامل میله لیزر می‌باشد، برای انجام عملیات پردازش تصویر انتخاب می‌کنیم (شکل ۳-۳).

۳- بهبود کیفیت یا افزایش کنتراست تصویر: تصویر با کنتراست بالا تصویری است که اگر نمودار تعداد (فراوانی) پیکسل‌ها را بر حسب شدت روشنایی در تصویر رسم کنیم، می‌بینیم که نمودار گسسته و باز می‌باشد و در واقع در محدوده ۰ تا ۲۵۵ پخش شده است و در نتیجه تفکیک نقاط به خوبی صورت گرفته است. اما تصویر با کنتراست پایین تصویری است که اگر نمودار تعداد (فراوانی) پیکسل‌ها را بر حسب شدت روشنایی در تصویر رسم کنیم، می‌بینیم که نمودار فشرده می‌باشد و در این حالت پیکسل‌ها متمرکز و در مرکز نمودار هستند. در این مرحله با بهبود کنتراست، به تصویر واضح تری دست یافتیم (شکل ۳-۴).



شکل ۷. تصاویر حاصل از پردازش تصویر. چپ: میله ۱ راست: میله ۲

۴. محاسبه

مراحل محاسبه را بصورت زیر انجام داده ایم [۹]:

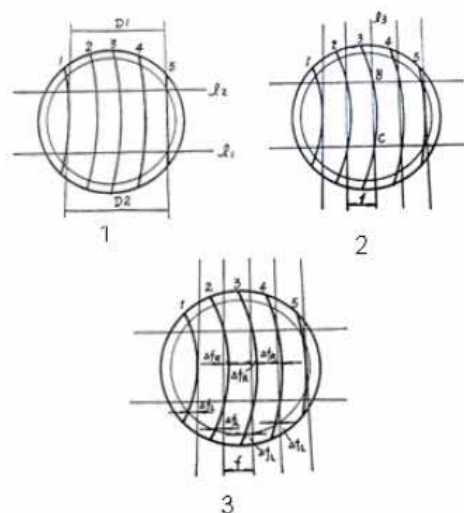
تعداد فرانتزها را از ۱ تا m مشخص می کنیم. سپس دو خط l_1 و l_2 را طوری رسم می کنیم که کل فرانتزهای ۱ تا m را قطع کند و فاصله آنها حداکثر باشد (شکل ۶-۱). فاصله D_1 و D_2 را اندازه می گیریم و فاصله متوسط فرانتزها (f) را از رابطه زیر بدست می آوریم.

$$f = \frac{D_1 + D_2}{2(m-1)} \quad (1)$$

فرانتز مرکزی را انتخاب می کنیم. دو نقطه B و C محل تقاطع فرانتز مرکزی با دو خط l_1 و l_2 می باشد و خط l_3 دو نقطه B و C را به هم وصل می کند. سپس خطوطی موازی خط l_3 و با فاصله مساوی f رسم می کنیم، به طوری که متناظر با هر فرانتز یکی از این خطوط داشته باشیم (شکل ۶-۲). حال برای هر فرانتز، بیشترین انحراف قسمتی از فرانتز که سمت راست خط قرار می گیرد را انحراف قله (Δf_R) می نامیم و بیشترین انحراف قسمتی از فرانتز که سمت چپ خط قرار می گیرد را انحراف دره (Δf_L) می نامیم (شکل ۶-۳). برای کلیه فرانتزها Δf_R و Δf_L را حساب می کنیم. مقدار Δf_{Rmax} ماکزیمم Δf_R ، همچنین Δf_{Lmax} مقدار ماکزیمم f_L

میان آرایه مرتب شده قرار گرفت (برای فیلتر میانگین 3×3 ، پنجمین عدد) جایگزین عددی می شود که در سطر سوم و ستون چهارم از تصویر نتیجه قرار دارد. این عمل برای تمام پیکسل های تصویر اصلی تکرار می شود. در این مرحله پیدا کردن فیلتر میانگین با ابعاد مناسب خیلی اهمیت دارد، زیرا با کوچک گرفتن همسایگی نویزها به خوبی حذف نمی شوند و در صورت بزرگ گرفتن همسایگی نیز دچار خطا شده و مرز نواحی تاریک و روشن به هم می خورد. برای نمونه در شکل ۵، فیلتر میانگین با سه همسایگی مختلف به تصویر میله لیزر اعمال شده است.

۵- مشخص کردن مرزهای تصویر و تفکیک نوارهای تداخلی روشن و تاریک و انتخاب و حذف لبه های تصویر (شکل ۳-۶).



شکل ۶. ۱- چگونگی رسم دو خط l_1 و l_2 - ۲ پیدا کردن l_3

۳- پیدا کردن Δf_R و Δf_L و f

۶- در صورتی که نواحی از فرانتزها بر اثر مراحل بالا حذف شده باشد، آنرا اصلاح می کنیم.

۷- نازک کردن نواحی تداخلی سفید یا سیاه به صورت خط (شکل ۳-۷).

۸- حداکثر می توان تا ۳۰ درصد فرانتزها را حذف کرد و محاسبات را روی بقیه فرانتزها انجام داد (شکل ۳-۸).

1 Peak deviation

2 valley deviation

اگر بیشینه اعوجاج فرانتز از خط مستقیم k و فاصله بین دو فرانتز d باشد، تغییرات ضریب شکست از رابطه زیر به دست می آید [۱۰]:

$$\Delta n = \left(\frac{k}{d}\right)\left(\frac{\lambda}{2L}\right) \quad (۸)$$

که λ طول موج لیزر و L طول میله لیزر می باشد.

۵. نتایج و بحث

ما برای دو میله لیزر Nd-YAG که میله اول با ابعاد قطر در طول $۵۰,۷۵ \times ۵$ میلیمتر و میله دوم با ابعاد قطر در طول $۷۰,۶ \times ۶$ میلیمتر بوده است، تداخل سنجی را انجام داده و با استفاده از برنامه نوشته شده به زبان متلب، روی فرانتزهای حاصله کار پردازش تصویر و محاسبه را انجام داده ایم، و مقادیر FH برای دو میله لیزری به دست آورده ایم. همچنین حداکثر تغییرات ضریب شکست Δn و مقادیر PV و rms برای هر میله لیزری را به دست آورده ایم. تصاویر حاصل از پردازش تصویر در شکل ۷ آمده است.

شکل ۸ تغییرات ضریب شکست را برای خطوط افقی متفاوت در مقطع هر میله نشان می دهد.

Δ را پیدا می کنیم. مقدار ماکزیمم انحراف قله تا دره را از رابطه زیر به دست می آوریم:

$$\Delta f_{\max} = \Delta f_{L\max} + \Delta f_{R\max} \quad (۲)$$

مقدار ماکزیمم انحراف قله تا دره که بر حسب طول موج با واحد میکرون بهنجار شده است را، از رابطه زیر به دست می آوریم:

$$PV = (\Delta f_{\max} \times CCD \text{ pixel size}) / \lambda \quad (۳)$$

مقدار جذر میانگین مربعی اعوجاج جبهه موج که بر حسب طول موج با واحد میکرون بهنجار شده است را، از رابطه زیر بدست می آوریم:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (\Delta f_{L\max})_m^2 + (\Delta f_{R\max})_m^2}{n}} \times \frac{CCD \text{ pixel size}}{\lambda} \quad (۴)$$

سپس تفاوت راه اپتیکی را از رابطه زیر بدست می آوریم.

$$(OPD)_f = \frac{\Delta f_{\max}}{f} \quad (۵)$$

برای یک تداخل سنج double-pass، تفاوت راه اپتیکی از رابطه زیر به دست می آید:

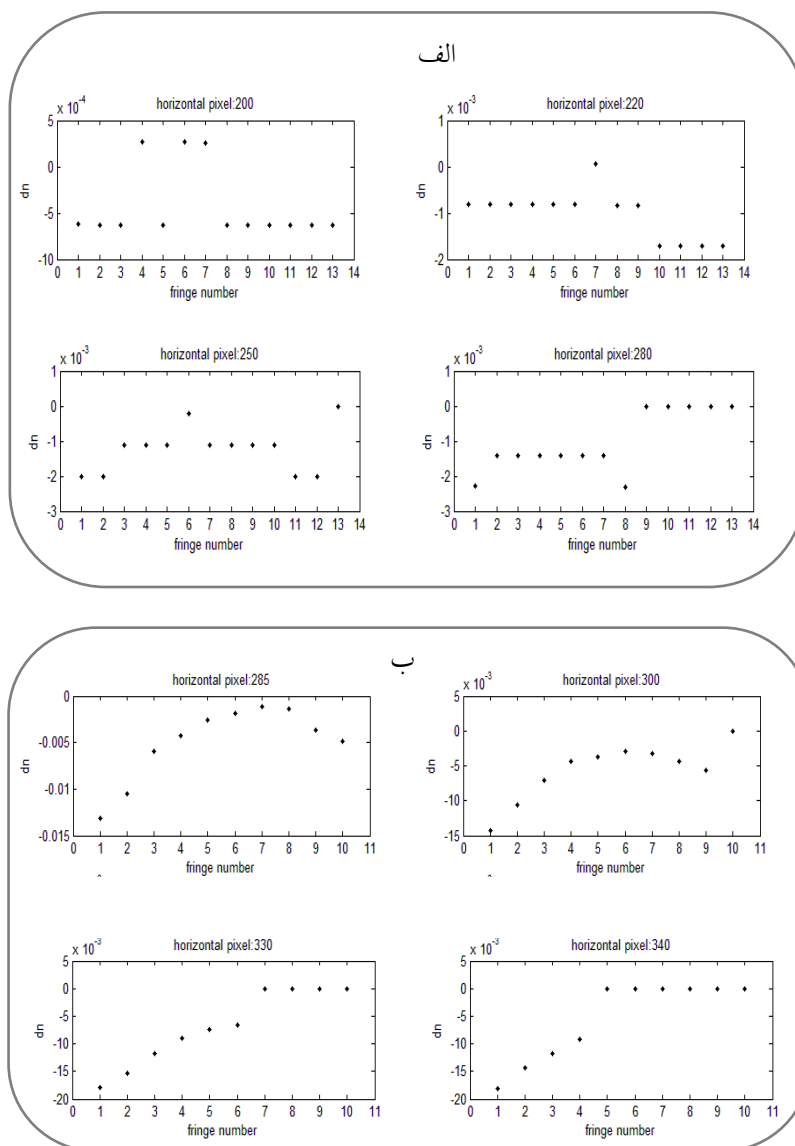
$$(OPD)_\lambda = (OPD)_f \cdot \frac{1}{2} \quad (۶)$$

مقدار انحراف قله تا دره جبهه موج در تعداد فرانتزها در اینچ طول (25 mm) را از رابطه زیر به دست می آوریم.

$$FH = \frac{25}{L} (OPD)_f \quad (۷)$$

که L طول میله لیزر تست شده است.

با توجه به اینکه اعوجاج جبهه موج حاصل تغییرات ضریب شکست در بلور می باشد، می توان با توجه به اعوجاج فرانتزها به تغییرات ضریب شکست در بلور پی برد.

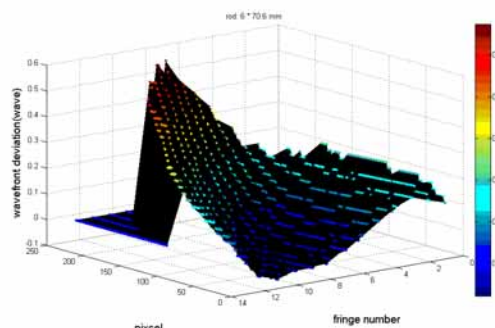


شکل ۸. تغییرات ضریب شکست برای خطوط افقی متفاوت درمقطع الف: میله

۱ و ب: میله ۲

جدول ۱ مقادیر به دست آمده FH و Δn و PV و rms از برنامه را برای دو میله نشان می دهد. برای هر میله ده بار ثبت طرح تداخلی و محاسبات را انجام داده و انحراف معیار آنها را محاسبه کرده ایم.

جدول ۱. نتایج حاصل از اندازه گیری دو میله لیزر Nd-YAG		
شماره میله لیزر	۱	۲
FH	0.09 ± 0.01	0.38 ± 0.02
Δn	0.002 ± 0.0002	0.019 ± 0.001
PV(wave in micron)	0.072	0.054
rms(wave in micron)	0.015	0.010



شکل ۹. انحراف جبهه موج برای میله ۲

شکل ۹ انحراف جبهه موج را برای میله ۱ نشان می دهد.

۶. نتیجه گیری

مقادیر FH و Δn و PV و rms که حاصل آزمایش تداخل سنجی برای میله لیزری ۱ و ۲ بوده است، با استفاده از برنامه متلب نوشته شده، محاسبه شده است. مشاهده می شود که میله ۱ که تغییرات ضریب شکست کمتری نسبت به میله ۲ دارد، مقادیر FH و PV و rms کمتری نسبت به میله ۲ دارد و از کیفیت بهتری نسبت به میله ۲ برخوردار است

مرجع ها

- [1] J M Bennett and J H Dancy, " *Stylus profiling instrument for measuring statistical properties of smooth optical surfaces*", *Appl. Opt.* vol.20, 1981, pp. 1785.
- [2] M. Li, C. Quan, C. J. Tay, " *Continuous wavelet transform for micro-component profile measurement using vertical scanning interferometry*", *Opt. Laser Technol.* Vol.40, 2008, pp.920.
- [3] B Dhanasekar and B Ramamoorthy, " *Digital speckle interferometry for assessment of surface roughness*", *Opt. Lasers Eng.* Vol.46, 2008, pp. 272.
- [4] P C Montgomery, A Benatmane, E Fogarassy, and J P Ponpon, " *Large area, high resolution analysis of surface roughness of semiconductors using interference microscopy*", *Mater. Sci. Eng. B* vol.79, 2002, pp. 91-92.
- [5] Chiayu Ai and James C. Wyant, " *Measurement of the inhomogeneity of a window*", *Optical Engineering* vol.30, 1991, pp.1399-1404.
- [6] M. V. R. K. Murty, *Newton, Fizeau, and Haidinger interferometers*, in *Optical Shop Testing*, pp. 1-45, John Wiley and Sons, New York, 1978.
- [7] Mikhail A. Krivoglaз, *X-Ray and Neutron Diffraction in Nonideal Crystals*, Springer, 1996.
- [۸] برادران مینا، رزاقی داوود، رزاقی حسین، " *محاسبه تفاوت راه اپتیکی از طرح تداخلی بدست آمده از میله لیزر نئودیمیم-یاگ در تداخل سنج توپمن-گرین*"، کنفرانس فیزیک محاسباتی ایران ۱۳۹۴، ۳۰ دی و ۱ بهمن ماه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
- [9] A.H.Guenther; *Optical intrferograms Reduction and Interperation*; ASTM International, Appendix 2, 1978.
- [10] DANIEL MALACARA, *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Inc., Copyright _ 2007