بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج با استفاده از تکنیک ماره

رضا عینی[۱]، امین بابازاده[۱]، رحمان نوروزی[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران.

چکیده – تکنیک ماره توانایی اندازه‌گیری انحراف‌های بسیار کوچک جبهه‌ی موج را دارد که این توانایی کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف ایجاد کرده است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به اندازه‌گیری جابجایی‌های بسیار کوچک یا اندازه‌گیری تلاطم جو اشاره کرد. در این مقاله با استفاده از تکنیک ماره روش جدیدی برای اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج نور فرودی معرفی شده و بصورت تجربی به انجام رسیده است. این روش بر پایه‌ی ابیراهی رنگی موجود در عدسی‌های مورد استفاده به‌منظور بزرگنمایی طرح ماره استوار است. داده‌های تجربی به‌دست آمده از سه منبع نوری با طول‌موج‌های ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتری نشان دهنده‌ی چرخش کلی حدود ۲۹/۳ درجه‌ای طرح ماره است که در توافق خوبی با داده‌های به‌دست آمده از محاسبات می‌باشد.

کلید واژه- تکنیک ماره، تغییرات طول موج، ابیراهی رنگی، طرح ماره.

Measuring Wavelength Alterations by Moiré Technique

Reza Eyni[1], Amin Babazadeh[1], Rahman Nouroozi[1]

[1]Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran

Abstract- Moiré technique has many applications in optical wavefront measurement and determination of small changes in e.g. tiny length transitions or atmospheric fluctuations. Based on the Moiré technique, this paper reports a new method to measure changes in wavelength of the incident light. This method is based on the chromatic aberration of the lens used for magnification of the Moiré pattern. Experimental results obtained from three different sources with 450 , 532 and 632 nm wavelengths show the total Moiré patterns rotation of about 29.3º which is in good agreement with calculated results.

Keywords: Moiré technique, wavelength alteration, chromatic aberration and Moiré pattern.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

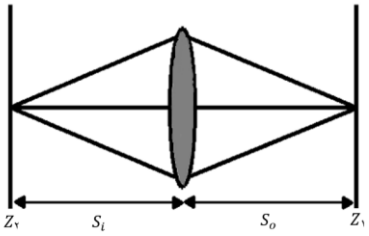
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

۱- مقدمه

از تکنیک ماره در اندازه‌گیری ضریب شکست غیرخطی [۱]، تعیین فاصله‌ی کانونی میکروعدسی [۲] و مطالعه‌ی تلاطم جو استفاده می‌شود [۳]. حال آنکه این امکان وجود دارد که از تکنیک ماره برای اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج نیز استفاده شود. در این مقاله از ابیراهی رنگی عدسی‌ها که پدیده‌ای ناخواسته و مضر در اپتیک هندسی است استفاده شده تا تغییرات طول‌موج نورهای مرئی اندازه‌گیری شود. چون المان‌های اپتیکی که ابیراهی رنگی دارند ارزان قیمت هستند روش پیشنهادی در این مقاله بسیار مقرون به‌صرفه بوده و می‌تواند کاربردهای بسیاری در زمینه‌های مختلف همچون حسگرهای اپتیکی و یا طیف‌سنجی داشته باشد.

۲- مبانی نظری

از یک عدسی می‌توان در سیستم تصویرسازی استفاده کرد به گونه‌ای که اگر جسم در فاصله S_o از عدسی قرار گرفته باشد، تصویری از آن در فاصله S_i تشکیل می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: سیستم تصویرسازی با یک عدسی. Z_1 و Z_2 به ترتیب مکان جسم و تصویر می‌باشد. همچنین S_o و S_i فاصله‌ی جسم و تصویر از عدسی است.

ماتریس انتقال این سیستم به صورت زیر است:

$$M=\begin{bmatrix} m & 0 \\ -\frac{1}{f} & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

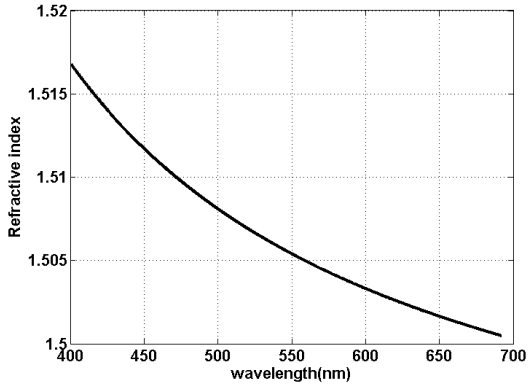
که در این رابطه $m=S_i/S_o$ بزرگنمایی و f فاصله‌ی کانونی عدسی تصویرساز است. حال اگر جسم مورد نظر یک توری با گام d_1 باشد با قرار دادن این توری در صفحه‌ی جسم، تصویری از این توری در فاصله‌ی S_i از عدسی تشکیل می‌شود که گام توری تشکیل شده (d_2) از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۴].

$$d_2=\frac{f}{s_0-f}d_1 \qquad (۲)$$

همچنان که دیده می‌شود، گام تصویر توری تشکیل شده تابعی از فاصله‌ی کانونی عدسی است. از آنجایی که فاصله‌ی کانونی عدسی برای یک شعاع ثابت (R) با طول‌موج تغییر می‌کند (تغییرات ضریب شکست (n) باعث تغییرات فاصله‌ی کانونی می‌شود)، گام توری تصویر شده نیز به طول‌موج ارتباط پیدا می‌کند. رابطه‌ی (۳) نحوه‌ی تغییرات فاصله‌ی کانونی عدسی با ضریب شکست را نشان می‌دهد [4]:

$$f=\frac{R}{2(n-1)} \qquad (۳)$$

در شکل ۲ تغییرات ضریب شکست با طول‌موج برای شیشه PK1 رسم شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود ضریب شکست عدسی در بازه‌ی طول‌موج نور مرئی در حدود ۰/۰۱۵ تغییر می‌کند.



شکل ۲: نمودار تغییرات ضریب شکست بر حسب طول‌موج برای عدسی ساخته شده از شیشه‌ی PK1.

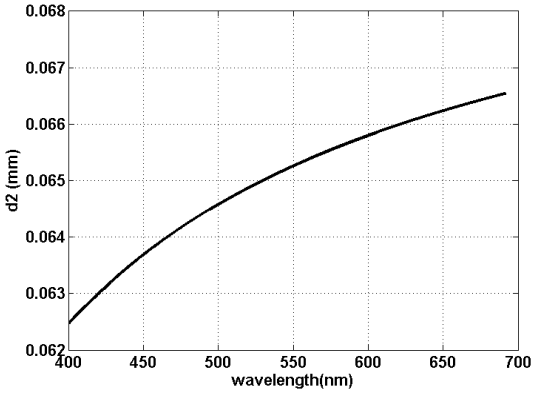
با توجه به روابط (۲) و (۳)، می‌توان این نتیجه را گرفت که گام توری تصویر شده توسط عدسی نسبت به طول‌موج متغیر است. در شکل ۳ تغییرات گام توری تصویر شده برای عدسی که از شیشه‌ی PK1 ساخته شده رسم شده است. در این نمودار گام توری اولیه ۰/۰۶۶ میلی‌متر و فاصله‌ی توری از عدسی برابر با ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشند. حال اگر در محل تصویر توری، یک توری مشابه با توری اول قرار دهیم، نوارهای تداخلی ماره تشکیل می‌شوند که زاویه‌ی این نوارهای تداخلی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید [۵].

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{d_1 \sin\theta}{d_1 \cos\theta - d_2} \qquad (۴)$$

در این رابطه d_2 , d_1 ,θ به ترتیب زاویه‌ی دو توری نسبت به هم، گام توری‌ها و گام تصویر توری می‌باشند. با تغییر طول‌موج، گام تصویر تشکیل شده از توری طبق رابطه (۲) تغییر می‌کند و در نتیجه زاویه‌ی نوارهای تداخلی ماره تشکیل شده تغییر می‌کند. به عبارت دیگر رابطه‌ی (۴) بیانگر تغییرات زاویه‌ی نوارهای تداخلی ماره بر حسب طول‌موج پرتو ورودی به سیستم است.

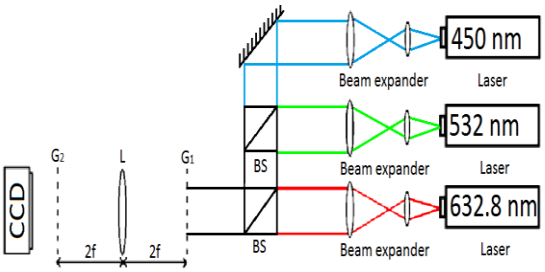


شکل ۳: نمودار تغییرات گام تصویر توری (d_2) بر حسب طول‌موج.

۳- چیدمان آزمایشگاهی و نتایج

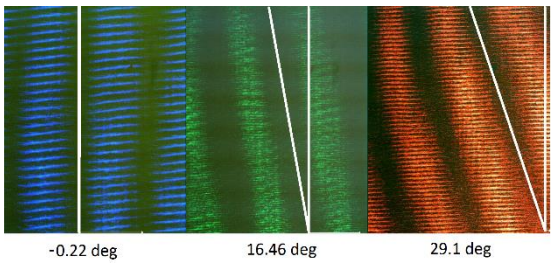
برای اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج در محدوده‌ی نور مرئی سه منبع نوری متفاوت شامل: لیزر هلیوم نئون با طول‌موج ۶۳۲/۸ نانومتر، دیود لیزر با طول‌موج ۵۳۲ نانومتر و دیود لیزر با طول‌موج ۴۵۰ نانومتر انتخاب شد. علت استفاده از انواع مختلف لیزر، پوشش دادن کل طیف مرئی است تا نشان داده شود که سیستم طراحی شده می‌تواند برای اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج کل طیف مرئی استفاده شود.

شکل ۴ شمایی از چیدمان آزمایشگاهی استفاده شده به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج با استفاده از تکنیک ماره را نشان می‌دهد. در این چیدمان نور لیزر بعد از پهن و موازی شدن توسط سیستم تلسکوپی، سطح توری G_1 را روشن می‌کند. توری در فاصله‌ی $2f$ از عدسی به شعاع ۵۰ میلی‌متر و از جنس PK1 قرار دارد. در این حالت تصویر توری در فاصله‌ی $2f$ با بزرگنمایی واحد در طرف دیگر عدسی تشکیل می‌شود.



شکل ۴: چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری تغییرات طول‌موج. نور خروجی از سه لیزر با طول‌موج‌های ۴۵۰، ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتر پس از پهن و موازی شدن توسط سیستم تلسکوپی، سطح توری G_1 را روشن می‌کند. عدسی، تصویری از توری را در فاصله‌ی $2f$ ایجاد می‌کند. از برهم‌نهی تصویر تشکیل شده و توری G_2 که در محل تصویر با زاویه ۳/۵ درجه قرار دارد نوارهای تداخلی ماره ایجاد و توسط دوربین ثبت می‌شود.

توری دوم را در فاصله‌ی $2f$ از عدسی، محل تشکیل تصویر توری اول، با زاویه‌ی ۳/۵ درجه قرار می‌دهیم. از برهم‌نهی توری حقیقی و توری مجازی نوارهای تداخلی ماره تشکیل می‌شود (شکل ۵). در نهایت این طرح ماره توسط یک دوربین تصویربرداری می‌شود.



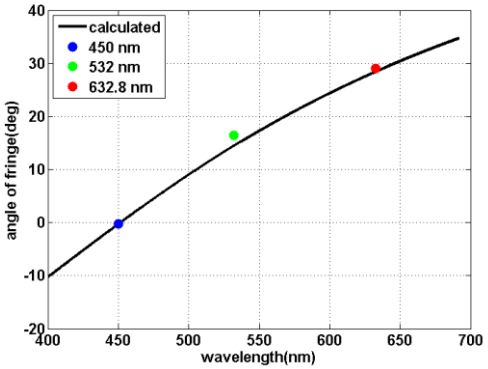
شکل ۵: طرح ماره مربوط به طول‌موج‌های (از راست به چپ) ۶۳۲/۸ نانومتر، ۵۳۲ نانومتر و ۴۵۰ نانومتر. در زیر شکل زوایایی که نوارهای تداخلی ماره با خط عمود می‌سازند بر حسب درجه نوشته شده است.

از آنجایی که گام‌های توری تصویر شده با طول‌موج تغییر می‌کند (رابطه (۲)) انتظار می‌رود که زاویه‌ی نوارهای تداخلی برای طول موج‌های مختلف، متفاوت باشد و از رابطه‌ی (۴) پیروی کند. همچنین صفر بودن درایه‌ی M_{12} در رابطه‌ی (۱) بدین معنی است که در نگاشت نقطه به نقطه از صفحه‌ی جسم به صفحه‌ی تصویر توسط سیستم تصویرسازی، اندازه‌ی تصویر ایجاد شده مستقل از زاویه‌ی پرتو خروجی از هر نقطه‌ی صفحه‌ی تصویر می‌باشد. بنابراین واگرایی یا همگرایی باریکه‌ی لیزر تنها اندازه‌ی ناحیه‌ی تصویر سازی از توری را تغییر می‌دهد. با توجه به این مسئله، انتظار داریم گام تصویر توری و در نتیجه زاویه‌ی

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

نوارهای تداخلی ماره مستقل از واگرایی یا همگرایی نور لیزرها باشد. در شکل ۵ طرح ماره‌ی تشکیل شده برای این سه نوع لیزر نشان داده شده است. همچنان که از شکل ۵ پیداست نوارهای تداخلی زوایای متفاوتی را نسبت به خط عمود پیدا کرده‌اند به گونه‌ای که برای لیزر آبی این زاویه ۰/۲۲- درجه، برای لیزر سبز ۱۶/۴۶ درجه و در نهایت برای لیزر هلیوم نئون ۲۹/۱ درجه می‌باشد.



شکل ۶: نمودار محاسبه شده‌ی تغییرات زاویه‌ی نوارهای تداخلی ماره بر حسب طول‌موج، نقاط قرمز، سبز و آبی نتایج تجربی می‌باشند.

به‌منظور مقایسه نتایج تجربی و تئوری، در شکل ۶ تغییرات زاویه برحسب طول‌موج با استفاده از روابط (۲-۴) رسم شده است. هم‌چنین مقادیر تجربی به دست آمده بر روی این نمودار نشان داده شده است. همچنان که از نمودار پیداست تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و تئوری وجود دارد.

5- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار تغییرات طول‌موج با استفاده از تکنیک ماره اندازه‌گیری شده است. برای این کار از ابیراهی رنگی موجود در عدسی ساخته شده از شیشه‌ی PK1 استفاده شده است. از آنجایی که فاصله‌ی کانونی با طول‌موج تغییر می‌کند و با تغییر فاصله‌ی کانونی جبهه‌ی موج خروجی از عدسی نیز تغییر می‌کند. می‌توان با اندازه‌گیری این تغییرات جبهه موج با استفاده از تکنیک ماره، به میزان تغییرات طول موج دست یافت. در این مقاله به صورت تجربی این تغییرات برای سه طول‌موج ۴۵۰ ، ۵۳۲ و ۶۳۲/۸ نانومتری انجام شده و با نتایج به دست آمده از محاسبات مقایسه شده است.

مراجع

[1] S. Rasouli, H. Ghasemi, M. T. Tavassoly, H. R. Khalesifard, ”Application of parallel moiré deflectometry and the single beam Z-scan technique in the measurement of the nonlinear refractive index”, Applied optics 50.16 (2011), 2356-2360.

[2] S. Rasouli, Y. Rajabi, and H. Sarabi. ”Microlenses focal length measurement using Z-scan and parallel moiré deflectometry”, Optics and Lasers in Engineering 51.12 (2013), 1321-1326.

[3] S. Rasouli, M. T. Tavassoly,” Moiré technique improves the measurement of atmospheric turbulence parameters”, Opt. Lett 5.12 (1980), 555-557.

[4] Frank L. Pedrotti, Leo S. Pedrotti, *Introduction to optics*, Second edition prentice hall, (1993).

[5] Patroski K, *Handbook of the moiré fringes technique*, Elesvire, (1993).

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]