
Measurement of the Wedge Angle and Bending of the Two Faces of the Laser Disk Active Medium Using a Single Shot Interference Pattern

M. R. Jafarfard^{*1}, M. H. Daemi²

* Physics Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: 21/12/2020; Accepted: 15/06/2021)

Abstract

In this paper, we have introduced a measurement scheme for the wedge angle and bending of the faces of the laser disk active medium. To increase the efficiency of the laser, the front face of the medium has been coated with an antireflection coating. In addition, a small wedge angle between the two faces of the medium has been considered to avoid the etalon effect inside the medium. Pumping the active medium causes thermodynamic effects and deformation of the faces of the medium. Characterization of this deformation is necessary for designing an adaptive optics and retrieving it in the resonator. For this purpose, a visible laser has been utilized which unlike the pumping beam has multi reflections from the faces of medium and contains the information of both wedge and bending. We have demonstrated that with a single shot interference pattern the information of the wedge and front and back faces of the medium can be measured.

Keywords: Disk Laser, Phase Measurement, Fourier Optics

* Corresponding author E-mail: mrjafarfard@iust.ac.ir

علمی-پژوهشی

اندازه‌گیری زاویه و خمش دو وجه محیط فعال لیزر دیسک با استفاده از تک عکس تداخلی

محمد رضا جعفر فرد^{۱*}، محمد حسین دائمی^۲

۱- استادیار دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت ایران ۲- استادیار مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

در این مقاله یک روش تداخلی برای اندازه‌گیری زاویه بین دو صفحه لیزر دیسک و خمش هر دو وجه محیط فعال لیزر دیسک معرفی می‌شود. برای افزایش بازدهی محیط فعال وجه جلویی آن با یک لایه ضد بازتابی برای طول موج باریکه پمپ کاواک لیزر پوشانده شده است. همچنین برای جلوگیری از اثر اتالونی یک زاویه بسیار کوچکی بین دو آن وجود دارد. دم‌ش در محیط فعال باعث اثرات ترمودینامیکی در آن شده و باعث تغییر انحنا و جوه آن می‌شود. اندازه‌گیری این تغییرات شکل برای ساخت سامانه اپتیک تطبیقی و جبران آن در تشدیدگر لیزر ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور از یک لیزر مرئی که برعکس باریکه پمپ، بازتاب چندگانه در این محیط دارد و هر کدام از بازتاب‌ها حاوی اطلاعات زاویه و خمیدگی وجوه محیط است، استفاده شده است. ما نشان داده‌ایم که با تنها یک طرح تداخلی می‌توان هر سه اطلاعات وجه جلویی و پشتی و زاویه بین آن را اندازه گرفت.

کلیدواژه‌ها: لیزر دیسک، اندازه‌گیری فاز، اپتیک فوریه

۱. مقدمه

بتوان با این لیزر مقادیر توان چند کیلوواتی را با کیفیت باریکه مناسب به دست آورد. این خمیدگی و تغییر شکل می‌تواند باعث کم شدن کیفیت باریکه در توان‌های بالا شود [۱-۲]. برای جبران و بازسازی این تغییر شکل در تشدیدگر احتیاج به اندازه‌گیری دقیق این خمیدگی می‌باشد. به‌طور متداول حسگر جبهه موج شاک-هارتمن^۲ به‌عنوان روشی قدرتمند برای اندازه‌گیری اختلاف راه نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳-۴]. ولی به دلیل بزرگ بودن اندازه میکروعدسی‌ها تفکیک فضایی تصویر ممکن است به اندازه کافی نباشد. همچنین ممکن است سرعت این دستگاه برای بررسی و اندازه‌گیری لحظه به لحظه و آنالیز تغییر شکل محیط فعال کافی نباشد. در دو دهه اخیر، سامانه‌های تداخل‌سنجی به‌عنوان یک روش بسیار دقیق و پرسرعت با توانایی تصویرسازی اختلاف راه نوری اجسام صلب و حتی سلول‌های بیولوژی، مورد توجه بسیاری از دانشمندان دنیا قرار گرفته است [۵-۷]. از بین روش‌های هولوگرافیک روش هیلبرت که در آن ابتدا از تبدیل فوریه و سپس فیلتر کردن بخش فازی و تبدیل معکوس فوریه استفاده می‌شود به‌عنوان روش بسیار برجسته‌ای شناخته می‌شود [۸-۱۰]. در این مقاله از روش تقسیم فضای فوریه برای اندازه‌گیری هم‌زمان فاز هر دو وجه دیسک و زاویه بین آنها استفاده شده است. به دلیل اندازه بسیار کوچک

محیط فعال لیزر دیسک بر روی یک زیرلایه فلزی و یا دی‌الکتریک متصل شده است و دم‌ش در طول موج پمپ به دلایل مختلف از جمله نارسایی کوانتومی^۱ باعث ایجاد گرما شده و متعاقباً اثرات ترموپتیک و ترمومکانیکی بروز خواهند نمود. این لیزر از یک وجه جلو پمپ می‌شود و دیسک از پشت به یک سامانه خنک‌کننده آبی متصل است. اساساً ایده دیسک نازک به این منظور شکل گرفت که اثرات گرادیان دمای عرضی (در امتداد شعاعی) و به تبع آن عدسی گرمایی را از بین ببرد، لیکن گرادیان طولی دما (در امتداد ضخامت دیسک) وجود خواهد داشت که علت آن خنک‌سازی از یک وجه صفحه سردی است که دیسک روی آن چسبانده شده است (شکل ۱). گرادیان دما در امتداد ضخامت دیسک نیز وجود خواهد داشت. این گرادیان باعث می‌شود که انبساط گرمایی نیز در امتداد ضخامت دیسک و صفحه سرد نایکنواخت باشد که در نهایت منجر به خمش دیسک و صفحه سرد می‌شود و اگر دیسک در حالت غیر دمیده به شکل آینه تخت باشد، در اثر دم‌ش به شکل آینه محدب درخواهد آمد. البته مقدار قدر مطلق توان دیوپتريک این عدسی گرمایی بسیار کمتر از مقدار آن در لیزرهای میله‌ای است، که باعث می‌شود

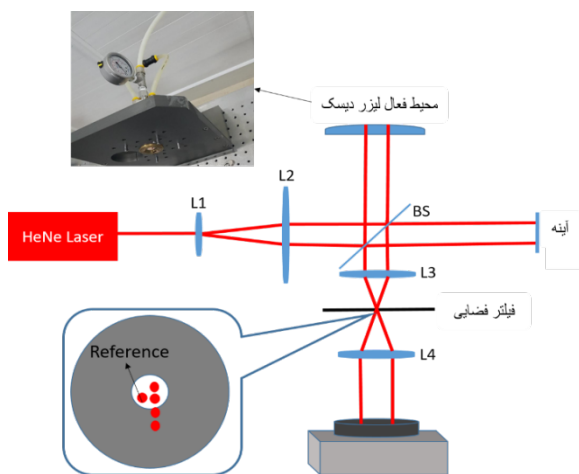
* نویسنده پاسخگو: mrjafarfard@iust.ac.ir

^۱ Quantum Defect

^۲ Shack-Hartmann Wavefront Sensor

مطابق شکل با باریکه مرجع به آن داده‌ایم، همه در یک راستا قرار می‌گیرند. قبل از ورود به دوربین یک سامانه $4f$ که یک فیلتر فضایی در فاصله کانونی آن تعبیه شده است، باعث فیلتر شدن تمام بازتاب‌ها به جز بازتاب اول و دوم و باریکه مرجع خواهد شد. این سه باریکه که با یکدیگر زاویه‌های θ_1 و θ_2 را دارند در دوربین با یکدیگر طرح تداخلی تشکیل می‌دهند. میدان الکتریکی این سه باریکه طبق اصل برهم نهی این سه باریکه در دوربین با یکدیگر مطابق رابطه زیر جمع می‌شوند:

$$E_T = E_R + E_1 \exp(k \sin \theta_1 (x + y) + \phi_1) + E_2 (k \sin \theta_2 (x + y) + \phi_2) \quad (1)$$



شکل (۲): شماتیک سامانه اندازه‌گیری زاویه و خمش دیسک

که در آن E_1 و E_2 و E_R به ترتیب دامنه میدان حاصل از بازگشت از سطح اول و دوم و باریکه مرجع است. ϕ_1 و ϕ_2 نیز فاز حاصل از شدت نهایی که در دوربین ضبط می‌شود. همچنین x و y شماره پیکسل محور افقی و عمودی دوربین است شدت نهایی که در دوربین ضبط می‌شود برابر است با:

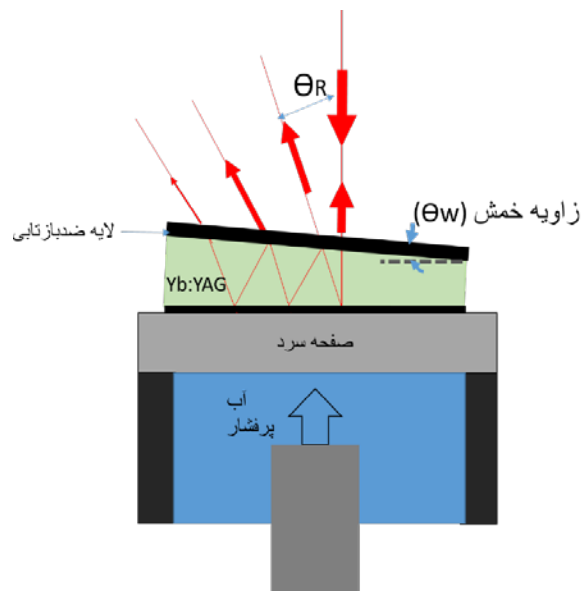
$$I = E_T \times E_T^* = I_1 + I_2 + I_R + 2\sqrt{I_1 I_R} \cos((k \sin \theta_1 (x + y) + \phi_1) + 2\sqrt{I_2 I_R} \cos((k \sin \theta_2 (x + y) + \phi_2) + 2\sqrt{I_2 I_1} \cos((k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) (x + y) + \phi_2 - \phi_1) \quad (2)$$

به دلیل تفاوت فرکانس فضایی هرکدام از جمله‌های کسینوسی، قله تبدیل فوریه هرکدام از جمله‌های فازی وجوه در فضای فرکانس از یکدیگر جدا می‌شوند و در نقاط مختلفی از فضا قرار می‌گیرند. بنابراین مطابق شکل (۳) با استفاده از یک فیلتر مناسب می‌توان اطلاعات فازی هرکدام از وجوه را از یک تک عکس استخراج کرد. برای به‌دست آوردن فاز هر وجه یک فیلتر گوسی به دور قله‌های مشاهده‌شده در شکل می‌زنیم و فاز هر

پیکسل‌های دوربین، تفکیک فضایی این سامانه نسبت به حسگر شاک-هارتمن به مراتب بهتر است. همچنین به دلیل اینکه از طول موج متفاوت از طول موج دمش استفاده می‌شود جداسازی و حذف باریکه‌های مربوط به دمش لیزر بسیار آسان‌تر خواهد بود. امتیاز مهم دیگر این سامانه سرعت بسیار بالای اندازه‌گیری آن است. زیرا در روش تقسیم فضای فوریه با استفاده از فقط یک عکس می‌توان تمام اطلاعات مربوط به دیسک را به‌دست آورد. بنابراین می‌توان اطلاعات را به‌صورت ویدیویی و آنلاین به‌دست آورد.

۲. آزمایش

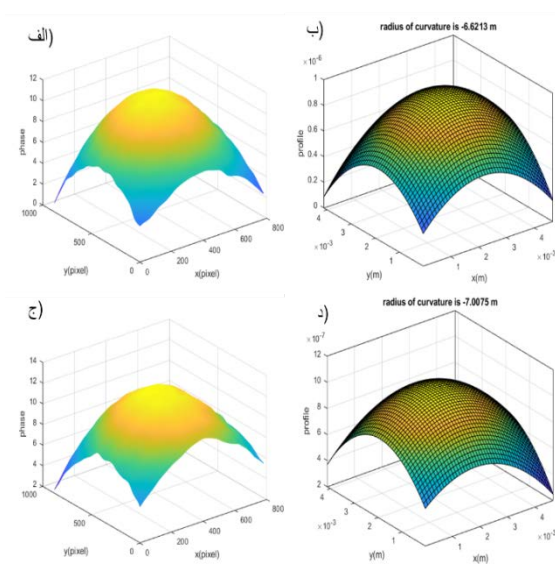
برای افزایش بازده دمش در لیزر روی سطح دیسک یک لایه ضد بازتابی برای طول موج دمش یعنی ۹۴۰ نانومتر قرار داده شده است که پرتو دمش بدون بازتاب وارد شود. این لایه الزاماً در طول موج مرئی ضدبازتاب نخواهد بود که همان‌گونه که در شکل (۱) نمایش داده شده است باعث بازتاب‌های چندگانه از سطح دیسک شده که تداخل این بازتاب‌ها باعث اختلال در اندازه‌گیری می‌شود. برای جلوگیری از این مشکل روش تقسیم فضای فوریه و جداسازی اطلاعات هر وجه در فضای فرکانس به کار گرفته شد.



شکل (۱): انحنای محیط فعال لیزر دیسک و زاویه خمش آن که باعث بازتاب چندگانه می‌شود.

در شکل (۲) چینه‌ش آزمایشگاهی مربوط به این سامانه تداخلی که بر پایه تداخل‌سنج مایکلسون است، نمایش داده شده است. پرتوی لیزر هلیوم نئون پس از عبور از باریکه گستر به باریکه‌شکاف خورده و یکی از آنها به‌عنوان پرتوی مرجع روی یک آینه تخت و دیگری روی دیسک فرود می‌آید. چندین بازگشت از سطح لیزر دیسک خواهیم داشت که با توجه به زاویه‌ای که

شکل (۴) فازهای به‌دست‌آمده از طریق تبدیل فوریه معکوس فاز فیلتر شده مربوط به هر یک از وجوه محیط فعال دیسک می‌باشد. $h(x, y)$ توزیع ارتفاع سطوح دیسک، با استفاده از شکل فاز و رابطه $h(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} \phi(x, y)$ و روش برازش منحنی، شعاع خمش مربوط به هر وجه دیسک به‌دست آمد.



شکل (۴): (الف) فاز وجه بالایی. (ب) پروفایل وجه بالایی. (ج) فاز وجه پایینی. (د) پروفایل وجه پایینی.

شکل (۴- الف و ب) فاز و پروفایل به‌دست‌آمده از تبدیل فوریه معکوس قله فیلتر شده مربوط به وجه بالایی دیسک است و قسمت ج و د این شکل فاز و پروفایل وجه پایینی دیسک است.

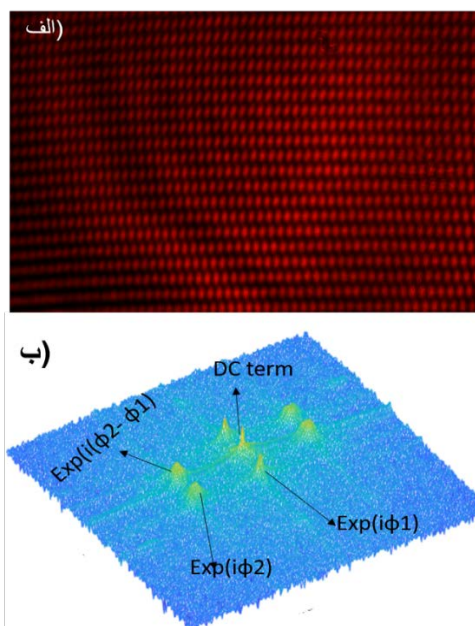
برای به‌دست‌آوردن زاویه بین دو وجه، از قله سوم استفاده می‌کنیم. بدین منظور با استفاده از قله مربوط به $\phi_2 - \phi_1$ در شکل (۳- ب) و حذف بقیه قله‌های فضای فرکانس و سپس تبدیل معکوس فوریه، کفایت فرکانس فضایی طرح تداخلی دو باریکه بازتابی بدون حضور باریکه مرجع را یافته و از رابطه فرکانس فضایی فریزرها در دوربین یعنی $q = \lambda / \sin \theta$ زاویه بین دو پرتوی فرودی به دوربین را پیدا کنیم. شکل ۵ طرح تداخلی به‌دست‌آمده با استفاده از حذف جمله‌های مربوط به باریکه مرجع در فضای فوریه است. زاویه دو صفحه دیسک با استفاده از رابطه هندسی ساده $\frac{\tan \theta_R}{\tan \theta} = \frac{f_2}{f_1}$ به‌دست می‌آید. که در آن f_1 و f_2 فاصله کانونی لنز اول و دوم در سامانه $4f$ و زاویه خمش دیسک و θ زاویه بین دو باریکه ورودی به دوربین می‌باشد. طبق شکل (۵) در هر ۵۰ پیکسل طرح تداخلی تکرار می‌شود. با توجه به اندازه پیکسل‌ها که برابر $4/65$ میکرون می‌باشد فرکانس فضایی طرح تداخلی برابر با $(4/65 \times 50)^{-1}$ می‌باشد. با قرار دادن مقدار فرکانس فضایی q در روابط $q = \lambda / \sin \theta$ و به‌دست آوردن

وجه را جدا می‌کنیم. با استفاده از تبدیل معکوس فوریه داده‌های فیلتر شده مربوط به هر یک از فازهای مربوط به ϕ_1 و ϕ_2 می‌تواند اطلاعات مربوط به آن وجه را به‌دست آورد.

$$I_{\phi_1} = \sqrt{I_1 I_R} \exp((k \sin \theta_1 (x + y) + \phi_1))$$

$$I_{\phi_2} = \sqrt{I_1 I_R} \exp((k \sin \theta_2 (x + y) + \phi_2))$$

(۳)



شکل (۳): (الف) طرح تداخلی باریکه‌های بازگشتی از لیزر (ب) تبدیل فوریه این طرح تداخلی و قله‌های مربوط به اطلاعات دو وجه

$k \sin \theta_1$ و $k \sin \theta_2$ که مربوط به زاویه‌ی دو باریکه ورودی به دوربین است، تعیین می‌کند که قله مربوط به فاز مربوطه در فضای فوریه کجا قرار بگیرد. با استفاده از تانژانت معکوس از هر کدام از روابط بالا و کم کردن یک تابع خطی می‌توان ϕ_1 و ϕ_2 که حاوی اطلاعات خمش دو وجه دیسک است را به‌دست آورد.

در نهایت با استفاده از آخرین جمله رابطه (۲) یعنی $2\sqrt{I_2 I_1} \cos((k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)(x + y) + \phi_2 - \phi_1))$ و به‌دست آوردن فرکانس زاویه‌ای در طرح تداخلی بدون باریکه مرجع بین دو باریکه بازگشتی وجه اول و دوم می‌توان زاویه بین این دو وجه را به‌دست آورد.

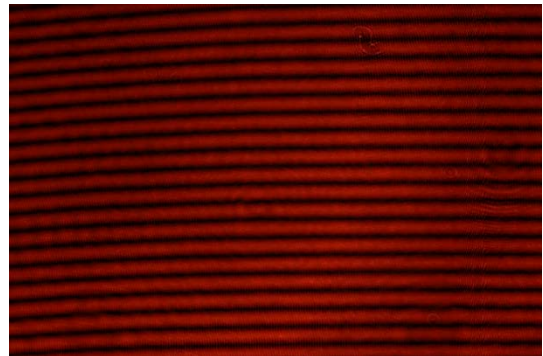
۳. نتایج

در این پژوهش برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی از حالت ساده‌تر اعمال انحنای با استفاده از فشار آب بهره‌جسته‌ایم تا در ادامه کار آن را برای حالت دیسک داغ نیز به کار ببریم. زمانی که فشار آب پشت دیسک به مقدار ثابتی رسید، یک عکس تداخلی ضبط شد. سپس با استفاده از روشی که در قسمت قبل گفته شد هم خمش دو وجه دیسک و هم زاویه بین دو وجه به‌دست آمد.

determining of electron density of Damavand tokamak plasma and calculation of the measurement error,” J. Appl. Electrom. 2016. 4, pp. 47-53. (In Persian)

- [8] G. Popescu, L. P. Deflores, J. C. Vaughan, K. Badizadegan, H. Iwai, R. R. Dasari, and M. S. Feld, “Fourier phase microscopy for investigation of biological structures and dynamics,” Optics Letters, 2004.
- [9] Takahiro Ikeda, Gabriel Popescu, Ramachandra R. Dasari, and Michael S. Feld, “Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems,” Optics Letters, vol. 30, pp. 1165-1167.
- [10] B. Tayebi, F. Sharif, M. R. Jafarfard, and D. Y. Kim, “Double-field-of-view, quasi-common-path interferometer using Fourier domain multiplexing,” Optics Express, vol. 20, pp. 26825-33, 2015.

زاویه θ ، زاویه بین دو صفحه یعنی θ_R برابر با 28° درجه به دست آمد.



شکل (۵): طرح تداخلی به دست آمده بعد از جداسازی جمله $\exp(i(\varphi_2 - \varphi_1))$ در فضای فرکانس و تبدیل فوریه معکوس آن

۴. نتیجه گیری

در این مقاله یک روش اندازه گیری سریع برای بررسی هم زمان دو وجه لیزر دیسک و زاویه بین این دو با وسیله تک عکس تداخلی معرفی شد. بدین منظور اطلاعات وجوه این دیسک که طبق معادلات تداخل سه پرتو در فضای فوریه جدا از هم قرار می گیرند را فیلتر کرده و سپس پردازش تصویر روی آن انجام شد. به دلیل کسب هر سه اطلاعات وجوه دیسک در یک تک عکس این روش امکان بررسی ویدیویی و آنالین محیط فعال لیزر دیسک را به ما می دهد.

۵. مراجع

- [1] A. Giesen and J. Speiser, “Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, vol. 13, pp. 598–609, 2007.
- [2] J. Mende, E. Schmid, J. Speiser, G. Spindler, and A. Giesen, “Thin disk laser: power scaling to the kW regime in fundamental mode operation,” Proc. SPIE, 2009.
- [3] S. Piehler, B. Weichelt, A. Voss, M. A. Ahmed, and T. Graf, “Power scaling of fundamental-mode thin-disk lasers using intracavity deformable mirrors,” Optics. Letters, vol. 37, pp. 5033–5035, 2012.
- [4] J. Muzik, M. Chyla, S. S. Nagisetty, T. Miura, K. Mann, A. Endo, and T. Mocek, “Precise curvature measurement of Yb:YAG thin disk,” Proc. SPIE, 2015.
- [5] P. Marquet, B. Rappaz, P. J. Magistretti, E. Cuhe, Y. Emery, T. Colomb, and C. Depeursinge, “Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy,” Optics Letters, vol. 30, pp. 468-70, 2005.
- [6] L.C. Chen, S. L. Yeh, A.M. Tapilouw, and J.-c. Chang, “3-D surface profilometry using simultaneous phase-shifting interferometry,” Optics Communications, vol. 18, 2010.
- [7] N. Nabipour and M. Karimi, “The effect of the propagation mode of a laser wave in an interferometer diagnostics in