طراحی و شبیه‌سازی سامانه تقویت اپتیکی هشت بار عبوری لیزر دیسک نازک

سعید عربکری، حمیدرضا شهرکی و شهرام کاظمی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده – در لیزر دیسک MOPA پرتو اولیه‌ای از داخل دیسک فعال دمش شده، عبور داده می‌شود تا توان آن تقویت گردد. به دلیل نازک بودن دیسک، لازم است که پرتو اولیه جهت تقویت مناسب، چندین بار بر روی آن بتابد. این کار نیازمند طراحی یک سامانه اپتیکی است. مهم‌ترین قید در طراحی این سامانه این است که قطر لکه در هر بار تابش بر روی دیسک ثابت بماند. در این مقاله طراحی و تحلیل یک سامانه هشت بار عبوری ارائه‌شده است. با استخراج ملاحظات اپتیکی و مکانیکی و نوشتن برنامه حل عددی، مشخصات دقیق این سامانه به دست آمد. به‌منظور تحلیل و بررسی سامانه طراحی‌شده، شبیه‌سازی‌هایی با نرم‌افزار Zemax و Oslo انجام شد. بررسی ابیراهی آستیگماتیسم و قطر لکه بر روی اجزاء اپتیکی و نیز بررسی مشخصات پرتو در صورت تغییر شعاع انحنای دیسک نشان داد که سامانه طراحی‌شده مشخصات لازم برای یک سامانه تقویت را داراست.

کلید واژه- دیسک، MOPA، چندبار عبوری، Zemax، Oslo.

Designing and Simulating an Eight Pass Optical Amplifier System for Thin-Disk Laser

Saeed Arabgari, Hamid Reza Shahraki, Shahram Kazemi

Iranian National Center for Laser Science and Technology

Abstract- In thin-disk MOPA laser a seed laser beam is propagated through a pumped thin-disk for power scaling. Since the disk active material is very thin, it is necessary to reimage the laser beam for several times onto the thin-disk to enhance the amplification coefficient. This requires an optical multi-pass system. The main feature of multi-pass is forming unique spot size on the disk at each pass. In this paper the scientific report of designing and analyzing an eight passes optical system is presented. At first, the optical and mechanical consideration are extracted and then a numerical code is developed to obtain the eight-passes parameters. Due to examining and analyzing the designed optical system, it is simulated by Zemax and Oslo optical software. Spot size of beam onto the different optical elements and astigmatism aberration as well as beam specification variation caused by changes in the thin-disk radius of curvature, are examined and the results prove that the designed eight passes optical system is optically and mechanically acceptable.

Keywords: Thin-disk, MOPA, Multi-pass, Zemax, Oslo

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

یکی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد لیزرها که باعث کاربرد روزافزون آن‌ها شده است توان خروجی بالا با وجود داشتن قطر لکه کوچک است. به همین دلیل یکی از جهت‌گیری‌های اصلی در توسعه لیزرها، افزایش توان خروجی لیزرها همزمان با بهبود کیفیت پرتو آن است[1]. لیزر دیسک به دلیل نازک بودن ماده فعال آن، برای دستیابی به این هدف طراحی و ساخته شد[2]، ازاین‌رو روش‌های مختلفی برای استحصال توان بالای خروجی توسط این لیزر پیش‌بینی و موردبررسی قرار گرفت[3]. یکی از جدیدترین این شیوه‌ها استفاده از روش تقویت‌کننده نوسان کننده اصلی (Master Oscillator Power Amplifier) یا به‌اختصار MOPA است. هدف از طراحی این روش، تولید لیزری با توان بالا و کیفیت پرتو بسیار خوب است. در روش دیسک MOPA، تقویت‌کننده، یک لیزر دیسک دمش شده است که پرتو لیزر اولیه از آن عبور می‌کند. ازآنجاکه ماده فعال دیسکی دمش شده، بسیار نازک است، پرتو لیزر اولیه با یک‌بار عبور از آن نمی‌تواند تمام وارونی جمعیت آن را تخلیه کند [4] و بازدهی تقویت بسیار اندک خواهد بود، به همین دلیل لازم است تا باریکه لیزر اولیه را چندین بار از داخل دیسک دمش شده عبور داده شود. برای همین منظور باید در لیزر دیسک MOPA از یک سامانه اپتیکی چندبار عبور استفاده کرد تا پرتو لیزر اولیه را چندین بار از داخل دیسک دمش شده عبور دهد[5].

۲- طراحی سامانه چند بار عبوری تقویت

برای ساخت یک سامانه چند بار عبوری باید ساختار اپتیکی طراحی کرد که باریکه لیزر اولیه را چندین بار از داخل دیسک عبور دهد.

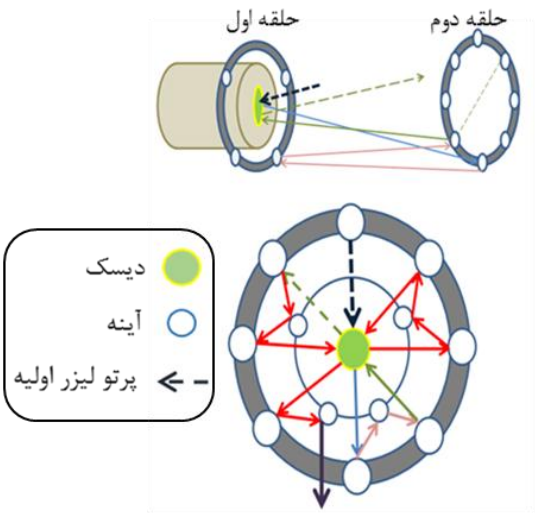
۲-۱- ملاحظات طراحی سامانه چند بار عبوری تقویت

اولین مسئله در طراحی سامانه چندبار عبوری، استخراج ملاحظات کارکردی سامانه هست: اولاً این سامانه، باید در هر بار بازتاباندن پرتو لیزر اولیه بر روی دیسک دمش شده، لکه‌ای ثابت و برابر با قطر دمش را ایجاد کند. ثانیاً، باید دارای ساختار و شکل هندسی منظم و قابل ساختی به لحاظ مکانیکی باشد. شکل ۱ یک سامانه چندبار عبوری با ساختاری منظم را نشان می‌دهد که دیسک دمش شده در محور آن قرار دارد. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد پرتو لیزر اولیه ورودی (فلش خط‌چین کوتاه) پس از برخورد به دیسک و عبور از دو آینه روبرویی و یک آینه کناری مجدداً به دیسک برخورد می‌کند و پس از عبور از داخل دیسک مجدد از آن بازتاب شده باز وارد سامانه می‌گردد و این بار با طی مسیر دیگری مجدداً بر روی دیسک می‌تابد. ردیابی کامل پرتو برای یک سامانه ۸ بار عبوری در تصویر پایینی شکل۱ نشان داده‌شده است. این تصویر از پشت حلقه مقابل دیسک ترسیم‌شده است و حلقه نازک مرکزی که بر روی آن چهارآینه قرارگرفته حلقه اول است که دیسک دمش شده در مرکز آن است.

۲-۲- طراحی سامانه اپتیکی

پس از طراحی ساختار کلی سامانه اپتیکی باید فاصله دو حلقه آینه‌ها از همدیگر و شعاع حلقه‌ها و شعاع انحنای آینه‌ها، قطر دهانه آینه‌ها به‌دقت مشخص شود. اما برای به دست آوردن این پارامترها باید به چند نکته توجه کرد.

اول اینکه بهتر است فاصله حلقه دوم از حلقه اول (که دور دیسک قرار دارد) تا حد امکان کوچک باشد تا ابیراهی آستیگماتیسم به حداقل برسد. از طرفی دیگر باید بتوان آینه‌ها را روی حلقه‌ها جای داد. رسم دقیق حلقه‌ها و نگهدارنده آینه‌ها نشان می‌دهد که فاصله حلقه‌های باید بین ۱ تا ۲ متر باشد.



شکل ۱: سامانه ۸ بار عبوری با دو حلقه از آینه‌ها که دیسک دمش شده مورداستفاده برای تقویت در مرکز حلقه اول قرار دارد.

دوم این‌که یکی از آینه‌های این سامانه هشت بار عبوری، دیسک می‌باشد ازاین‌رو باید شعاع انحنای دیسک را حتماً

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

به دست آورد. در این گزارش، شعاع انحنای دیسک R_d=4.5m است.

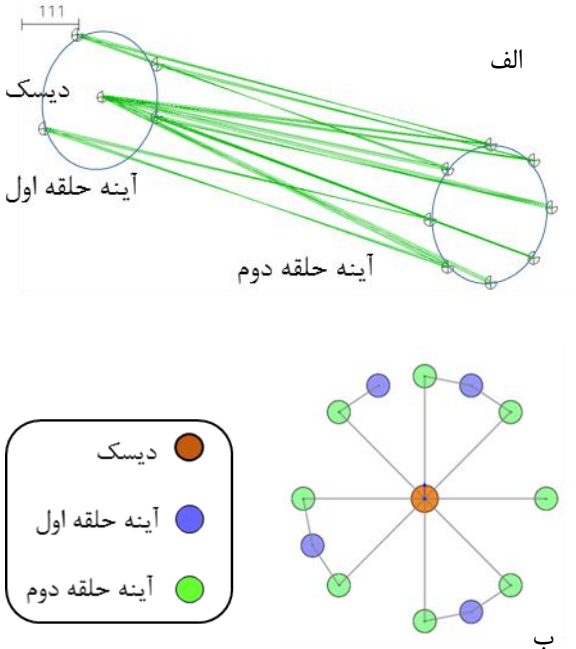
سوم اینکه باید اندازه لکه دمش بر روی آینه‌ها بزرگ‌تر از قطر دهانه آینه‌ها نباشد یا بیش‌ازاندازه کوچک نباشد.

پس از در نظر گرفتن قیدهای مکانیکی و اپتیکی، یک برنامه عددی بر اساس فرمول‌های انتشار پرتو گاوسی نوشته شد[6] تا با جایگذاری فواصل مختلف بین حلقه‌ها و شعاع انحنای آینه‌ها، سامانه‌ای را به دست آورد که در آن اولاً قطر لکه روی دیسک همیشه ثابت باشد و ثانیاً قطر لکه روی آینه‌ها محدود باشد. چندین جواب برای این مسئله به دست آمد که با توجه به ملاحظات برشمرده شده، یکی از جواب‌ها برای بررسی انتخاب شد.

۳- شبیه‌سازی با نرم‌افزار اپتیکی

در این بخش گزارش شبیه‌سازی جواب برگزیده طراحی سامانه هشت بار عبوری ارائه می‌شود. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای Zemax و Oslo انجام‌شده است. پس از انجام طراحی سامانه در برنامه Zemax، یک منبع نوری گاوسی از سامانه، عبور داده‌شده و مشخصات لکه روی اجزاء اپتیکی موردبررسی قرارگرفته شد. همچنین برای اجتناب از بروز مشکلات ساخت و نیز افزودن لیزر اولیه به سامانه تقویت ابتدا ملاحظات و محدودیت‌های مکانیکی همچون محل استقرار سامانه دمش، فاصله بین اجزاء، زوایای آینه‌ها به کمک نقشه‌های موجود نرم‌افزار Solid Works بررسی و تحلیل‌شده است.

این نقشه شامل یک دیسک با شعاع انحنای ۴۵۰۰ میلی‌متر، هشت آینه با شعاع انحنای ۱۵۰۰ میلی‌متر و چهارآینه با شعاع انحنای ۹۰۰ میلی‌متر است. این نقشه دارای چیدمان سه‌صفحه‌ای نسبت به محور اپتیکی دیسک می‌باشد که در صفحه اول (صفر محور اپتیکی) آینه‌هایی با شعاع انحنای ۹۰۰ میلی‌متر(آینه‌های بنفش‌رنگ شکل ۲) و صفحه دوم در نقطه ۶.۱ میلی‌متری محور اپتیکی شامل دیسک (آینه نارنجی‌رنگ) و در صفحه سوم در نقطه ۱۵۰۰ میلی‌متری آینه‌های با شعاع انحنای ۱۵۰۰ میلی‌متری قرار دارد. که آینه‌ها در دو صفحه اول و سوم روی دایره‌ای با شعاع ۱۳۵ میلی‌متری با مرکزیت محور اپتیکی قرارگرفته است.



شکل ۲: طراحی سیستم چند عبوری MOPA در نرم‌افزار Solid Works از دو دیدگاه الف) دید فضایی ب) دید از روبه‌روی دیسک.

۴- نتایج شبیه‌سازی

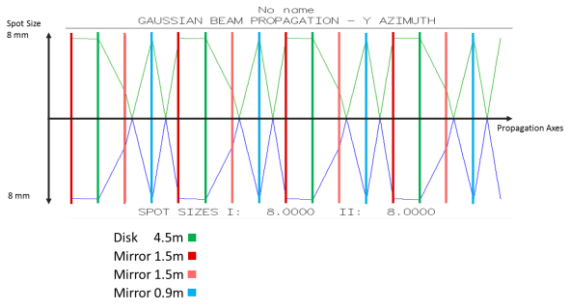
مشخصات پرتو گاوسی ورودی به‌صورت زیر می‌باشد. این پرتو که به‌عنوان پرتو لیزر اولیه می‌باشد دارای کیفیت M^2=1 می‌باشد.

$$\begin{aligned} &\omega_0 = 5.616mm \\ &\omega(z) = 8mm \\ &Z = -9.7593\times10^4\,mm \\ &R(z) = -1.9242\times10^5\,mm \end{aligned} \qquad (۱)$$

که ω_0 شعاع کمره باریکه و $\omega(z)$ شعاع باریکه در روی دیسک و Z فاصله کمره تا دیسک و $R(z)$ شعاع انحنای باریکه در روی دیسک می‌باشد. در اولین بررسی، انتشار پرتو گاوسی با مشخصات بالا را به‌صورت پیرامحوری در نرم‌افزار Oslo موردبررسی قراردادیم همان‌طور که در شکل زیر برای دو حل مختلف (رنگ سبز و آبی یا I و II) نشان می‌دهد شعاع اندازه لکه لیزر روی آینه اول ۸ میلی‌متر و تقریباً همین شعاع روی آینه دوم یا دیسک هم حفظ می‌شود و در روی آینه سوم این شعاع به حدود ۲.۷ میلی‌متر کاهش می‌یابد و در روی آینه چهارم دوباره این اندازه به حدود ۷.۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد و این ترتیب روی آینه‌های بعدی هم تکرار می‌شود (شکل ۳).

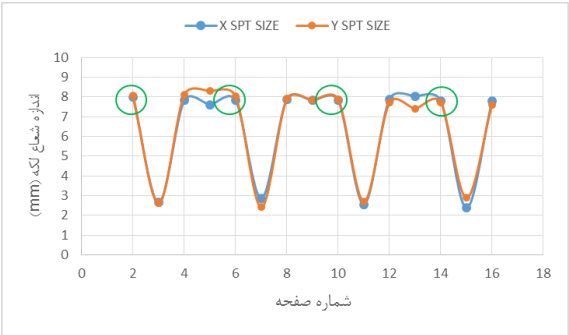
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]



شکل ۳: انتشار پرتو گاوسی به‌صورت پیرامحوری روی سطوح مختلف.

در ردیابی مورب پرتو گاوسی که مثل چیدمان قبلی صورت گرفت، داده‌ها برای جهت‌های x و y به‌صورت جداگانه محاسبه شد (شکل ۴).



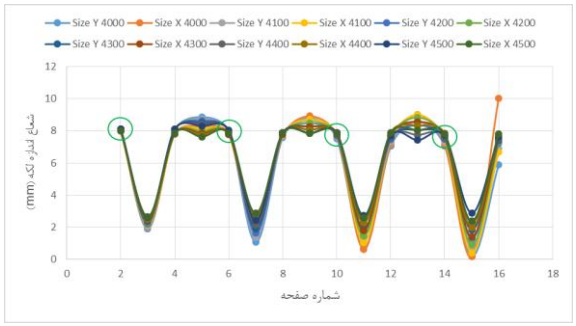
شکل ۴: تغییرات قطر لکه در جهت x و y درروی صفحات مختلف- دیسک با دایره سبزرنگ نشان داده‌شده است

این نمودار آستیگماتیسم بسیار کم‌پرتو بر روی دیسک و آستیگماتیسم اندک بر روی آینه‌های حلقه دوم را نشان می‌دهد.

٤-١- بررسی تغییرات انحنای دیسک و تأثیر آن بر روی قطر لکه باریکه

همان‌طور که می‌دانیم شعاع انحنای دیسک براثر افزایش توان دمش تغییر می‌کند. لذا نحوه تغییر شکل لکه تقویت شونده در شعاع انحناهای مختلف دیسک باید بررسی شود.

برای این منظور شش شبیه‌سازی را برای دیسک با شعاع بین ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ میلی‌متر با گام‌های ۱۰۰ میلی‌متری انجام دادیم و نتایج تأثیر آن بر روی پرتوی ورودی با مشخصات قبلی و همان چیدمان قبلی را به‌صورت شکل زیر مقایسه کردیم.



شکل ۵: تغییرات قطر لکه در جهت x و y درروی صفحات مختلف برای تغییر شعاع انحناهای دیسک از ۴۰۰۰ تا ۴۵۰۰ میلی‌متر.

ملاحظه می‌شود که در سامانه طراحی‌شده اندازه لکه روی دیسک تقریباً ثابت و دارای اختلاف کمی بین جهت x و y می‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد تغییرات دیوپتر دیسک مشکلی در عملکرد سامانه تقویت لیزر MOPA ایجاد نکند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با نرم‌افزارهای Oslo و Zemax نشان می‌دهد که سامانه هشت بار عبوری تقویت طراحی‌شده، همواره لکه ثابتی را روی دیسک ایجاد می‌کند. همچنین قطر لکه روی آینه‌ها مقادیر قابل قبولی دارد و سامانه از آستیگماتیسم قابل قبولی برخوردار است. همچنین با تغییر دیوپتر دیسک شکل فضایی لکه تقویت، اعوجاجات حادی که حاکی از بروز مشکلی در عملکرد سامانه ۸ بار عبوری باشد، ایجاد نمی‌شود.

مراجع

[1] S. Radmard, S. Arabgari, and M. Shayganmanesh, “Optics & Laser Technology Optimization of Yb : YAG thin-disk-laser design parameters considering the pumping-light back-reflection,” *Opt. Laser Technol.*, pp. 1–6, 2014.
[2] R. A. Meyers, *Encyclopedia of physical science and technology*. Academic Press, 1987.
[3] A. Giesen and J. Speiser, “Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws,” *Sel. Top. Quantum Electron. IEEE J.*, vol. 13, no. 3, pp. 598–609, 2007.
[4] C. P. João, J. Wemans, and G. Figueira, “Numerical simulation of high-energy, ytterbium-doped amplifier tunability,” *Appl. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 288–298, 2013.
[5] A. Antognini, K. Schuhmann, F. D. Amaro, F. Biraben, A. Dax, A. Giesen, T. Graf, T. W. Hänsch, P. Indelicato, L. Julien, C. Kao, P. E. Knowles, F. Kottmann, E. Le Bigot, Y. Liu, L. Ludhova, N. Moschüring, F. Mulhauser, T. Nebel, F. Nez, P. Rabinowitz, C. Schwob, D. Taqqu, R. Pohl, T. W. Hansch, P. Indelicato, and L. Julien, “Thin-disk Yb: YAG oscillator-amplifier laser, ASE, and effective Yb: YAG lifetime,” *Quantum Electron. IEEE J.*, vol. 45, no. 8, pp. 993–1005, 2009.
[6] E. A. B. Saleh and M. C. Teich, “MC, Fundamentals of Photonics,” *Ch*, vol. 18, pp. 784–803, 2007.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]