بررسی عملکرد لیزر دیسک در چیدمان MOPA از منظر کیفیت پرتو

سید محمد مهدی فاطمی ابهری ، مهدی شایگان منش

ایران، تهران، رسالت، خیابان هنگام، خیابان دانشگاه، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

هدف اصلی، مطالعه بر روی میزان تقویت و کیفیت باریکه‌ی خروجی لیزر در سیستم MOPA است. مقدار این دو کمیت، برای ۱ تا ۱۰ عبورِ نور ورودی در سیستم تقویت کننده، بررسی و گزارش خواهد شد. تمامی محاسبات با روش اپتیک موجی و از طریق انتگرال کولینز انجام‌شده است. کیفیت باریکه با فاکتور M^2 سنجیده شده است. پس از بررسی تغییرات حرارتی به وجود آمده توسط لیزر پمپ بر روی دیسک نازک، تأثیرات آن در طراحی هندسه‌ی تقویت‌کننده لحاظ می‌شود. شبیه‌سازی‌های تغییرات حرارتی دیسک نازک توسط نرم افزار SolidWorks Simulation صورت پذیرفته است. نتایج حاصل در نرم‌افزار MatLab وارد شده و تغییرات شکلِ توزیع شدت باریکه ورودی، به‌صورت سه‌بعدی محاسبه‌شده است. در پایان، به یک طراحی تقویت‌کننده‌ی لیزر چند عبوری با مقادیر خروجی توان تقویت‌شده و کیفیت باریکه قابل پیش‌بینی، دست خواهیم یافت.

کلید واژه‌ها: تقویت‌کننده چند عبوری لیزر دیسک نازک، لیزر دیسک نازک، کیفیت پرتو، اختلاف راه نوری، تنش حرارتی، گرادیان دمایی

study of operation MOPA method in Thin disk laser and its effect on laser beam quality

Mohammad Mahdi Fatemi , Mahdi Shayganmanesh

Iran, Tehran, Resalat, Hengam st, Iran University of Science and Technology

Abstract

The goal of this paper is studying the amplification rate and the quality of the output beam in a MOPA system. We focus on a stable amplifier. We study and analyze these two quantities for one to ten times of input beam pass into the amplification system. all computations are done using the optical wave method using Collins integral. We quantify the quality of the beam using M^2 factor. After analyzing the changes induced by pump laser on a thin disk, we consider the effects in geometrical design of the amplifier. We use SolidWoks Simulation to simulate the changes of the thin disk due to heat absorption from pump and mounting system. Results then are inserted into MATLAB and changes in the shape of the intensity distribution are computed in a ۳D regime. Finally, we would conclude a design for a multi-pass amplifier with predictable output power and quality of the amplified laser beam.

Keys: Master oscillator power amplifier, M^2 factor, Thin disk laser, Optical pass difference, Thermal tensile, Temperature gradient

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

یکی از روش‌های ساخت لیزرهای پرتوان با بازده بالا و کیفیت باریکه بالا، سیستم تقویت‌کننده چند عبوری است. این سیستم ضمن افزایش توان خروجی، دستیابی به کیفیت باریکه‌ی بالا را امکان‌پذیر می‌نماید. مزیت نسبی این روش، نسبت به استفاده از رزوناتورهای چند دیسکی، پیچیدگی فنی کمتر و ساخت آسان تر آن است. در این پژوهش، کاربرد لیزر دیسک نازک به عنوان مکانیزم تقویت کننده‌ی لیزر، تحت عنوان تقویت کننده‌ی چند عبوری پرداخته خواهد شد.

به همین دلیل به آن:



Master Oscillator Power Amplifier یا همان MOPA می‌گویند.[1]

در هنگام پمپاژ دیسک ، بخشی از توان پمپاژ جذب‌شده و بصورت حرارت در دیسک توزیع می‌شود. درنتیجه ناحیه پمپاژ دیسک نازک یک گرادیان دمایی در جهت محور دیسک مشاهده می‌کند. این گرادیان دمایی توزیع‌های ناهمگنی از استرس و کشش ایجاد می‌کند. پروفایل‌های ناهمگن دما، استرس و کشش باعث ایجاد چندین اثر مختل کننده‌ی تابع موج در عمل لیزر می‌شوند. این اثرات عبارت‌اند از: شکست، کشش شامل دوشکستی و لنز حرارتی. این آثار، عامل‌های اصلی محدودکننده و مختل کننده‌ی توان و کیفیت باریکه در تقویت کننده‌ها هستند. با شبیه‌سازی آثار حرارتی بر روی دیسک نازک، می‌توان تاثیر آن‌ها بر روی کیفیت پرتوی لیزر خروجی را محاسبه نمود. و درنهایت با طراحی مناسب تقویت کننده، با این شرایط، می‌توان تاثیر عوامل مخرب بر کیفیت پرتو را به حداقل رساند.[3][2]

۲- روش پژوهش

با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks شبیه سازی اثرات حرارتی بر روی دیسک انجام می‌شود. سپس با استفاده از محاسبات اپتیک موجی، در MATLAB، تغییرات توان و کیفیت باریکه‌ی خروجی نسبت به باریکه واردشده به تقویت‌کننده، تا ۱۰مرتبه عبور محاسبه می‌شود.

۳- تئوری محاسبات

پس از محاسبه‌ی OPD(جابجایی فاز نوری) حاصل از گرادیان دمایی، تغییر شکل و کشش حرارتی ناشی از دو شکستی و اعوجاج فاز اپتیکی در کریستال دیسک نازک به دو بخش کروی و غیر کروی به این صورت تقسیم می‌شود:

$$\phi(r)=\frac{2\pi}{\lambda}OPD(r)=\frac{2\pi r^2}{\lambda R_{disk}}+\Delta\phi(r) \qquad (۱)$$

R_{disk} شعاع بخش کروی اعوجاج فاز اپتیکی در طراحی تشدیدگر فرض شده است. بخش کروی، که خمیدگی دیسک نام دارد یکی از ادوات اپتیکی در نظر گرفته می‌شود که تأثیر آن در ماتریس‌های انتقال تقویت‌کننده وارد می‌شود.[4] باید توجه شود R_{disk} به‌هیچ‌وجه واقعیت فیزیکی ندارد و با شعاع واقعی خمیدگی دیسک برابر نیست.

حال باید این اعوجاج فازی غیر کروی را در میدان نور عبوری از کریستال لیزر در جریان محاسبات مربوط به لیزر (با استفاده اپتیک موجی) به‌صورت زیر وارد نمود:[5]

$$E=E(x)\times e^{i\phi(r)}=E(x)\times e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\times\Delta_{asphericalf}(r)} \qquad (۲)$$

$\Delta_{asphericalf}(r)$اعوجاج فازی غیر کروی نسبت به فاصله از محوردیسک و λ طول‌موج لیزر است. با داشتن این میدان و پارامترهای ماتریسی تقویت کننده می‌توان توسط انتگرال کولینز[6] میدان پرتو خروجی را بدست آورد. با استفاده از میدان بدست‌آمده، کیفیت باریکه‌ی کل قابل محاسبه است. در مورد باریکه‌های غیر گاوسی همدوسی کامل، پارامتر M^2 بصورت زیر تعریف می‌شود[7]:

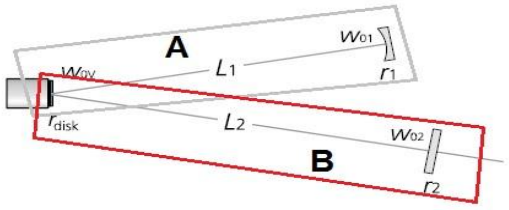
$$M^2=\frac{\pi\omega(E)}{\lambda}\sqrt{[\theta_0(\phi)]^2-\frac{[\omega(E)]^2}{[R(E)]^2}} \qquad (۳)$$

که در آن $\theta_0(\phi)$، $\omega(E)$، $R(E)$ به ترتیب، واگرایی باریکه تعمیم‌یافته، پهنای باریکه تعمیم‌یافته و شعاع انحناء جبهه موج تعمیم‌یافته می‌باشند[7]. در ابتدا طراحی تقویت کننده لیزر دیسک ۱۰عبوری با داشتن شرایط خودبازساز،

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

همانند شکل(۱) در نظر گرفته می‌شود[3].



شکل۱: نحوه‌ی تقسیم بندی نواحی تقویت کننده[3].

جدول۱: مشخصات اجزای تقویت کننده‌ی طراحی شده

ادوات اپتیکی	r2(m)	r1(m)	L1(m)	L2(m)	R_{disk}
مقادیر محاسبه‌شده	∞	-۰/۵	۲/۳۰۵	۲/۱۹۸	۲/۰۲۳

دیسکی با ماده‌ی فعال Yb_YAG با مشخصات زیر در نرم‌افزار شبیه‌ساز، فرض شده است.[8]

جدول۲: مشخصات دیسک شبیه سازی شده.[8]

parameter	value
radius of disk	5mm
thickness	200 μ m
doping concentration	10at%
Thermal exchange coff. In bottom surface(h1)	10^5 W/(M^2.K)
Thermal exchange coff. In top surface(h2)	10 W/(M^2.K)
coolant temperature ($T_{coolant}$)	283K
Air temperature (T_{air})	300K
parabolic and folding mirrors reflectivity	99.50%
Pump power	800W
Pump profile	Top-hat
pump radius	3mm
Heat fraction	14.60%
Youngs's modulus	310GPa
poisson ratio	0.3
dn/dt	7.3 ×$10^{-6}$$K^{-1}$
Thermal expansion coefficient	7.8 ×$10^{-6}$$K^{-1}$

با لحاظ نمودن اثر تغییر فاز غیر کروی به‌صورت جمله‌ی:

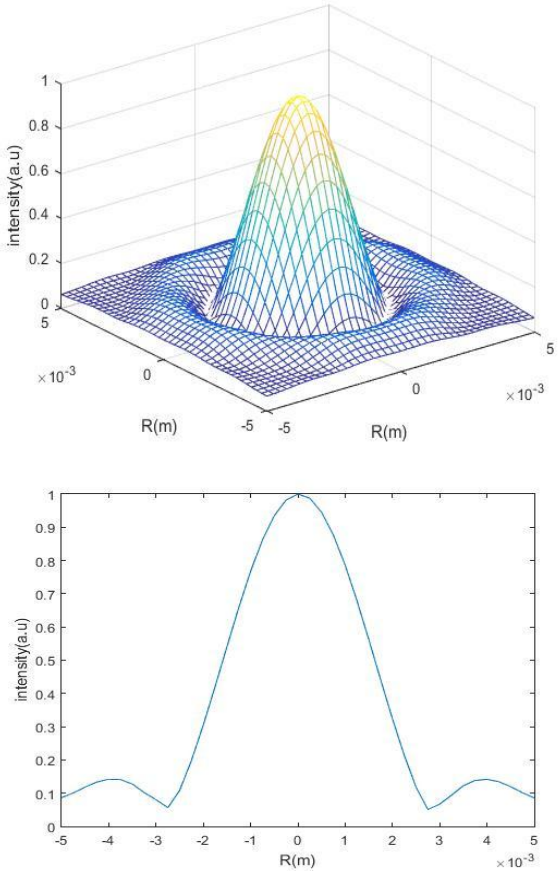
$$E = E(x) \times e^{i\phi(r)} \qquad (۶)$$

در محاسبات و نیز واردکردن عامل تقویت بصورت:

$$E = E \times e^{GL} \qquad (۷)$$

در هر مرتبه از محاسبات، می‌توان، توان و تابع موج خروجی را محاسبه نمود. بهره سیگنال کوتاه در این محاسبات بصورت تابع سوپرگوسی مرتبه۱۵ با بیشینه‌ی ۱.۰۹۵در محدوده‌ی پمپاژ دیسک و ضریب اتلاف ۰.۹در ناحیه‌ی غیر پمپاژ دیسک فرض شده است. ϕاختلاف فاز، G ضریب بهره وL مسافت طی شده است[9]. لازم به ذکر است که، منظور از تابع موج خروجی، همان تابع موج در دهانه‌ی خروجی تقویت‌کننده است. بدین سبب باید تأثیر حرکت موج در فضای آزاد داخل تقویت‌کننده، از دیسک تا لبه‌ی خروجی نیز محاسبه شود. پرتو ورودی به تقویت کننده بصورت تابع ورودی به سیستم تقویت کننده، گوسی فرض می‌شود. در این حالت پارامتر کیفیت پرتو برابر با واحد($M^2 = 1$) فرض می‌شود.

درنهایت شکل تابع شدت باریکه خروجی بعد از۱۰ رفت و برگشت بصورت شکل(۲) به‌دست‌آمده است :



شکل۲: توزیع شدت باریکه خروجی بعد از ۱۰ رفت‌وبرگشت.

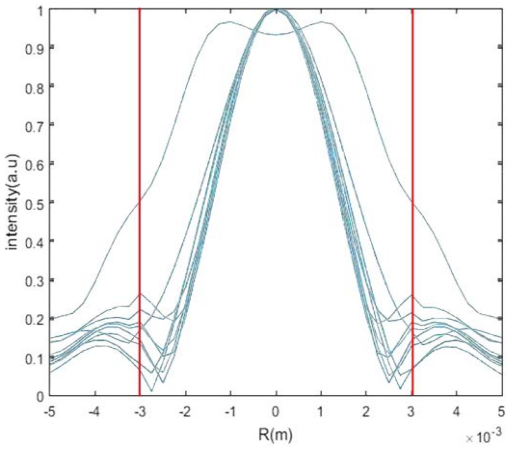
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

جدول ۳: توان، شعاع باریکه و کیفیت تابع موج‌های خروجی.

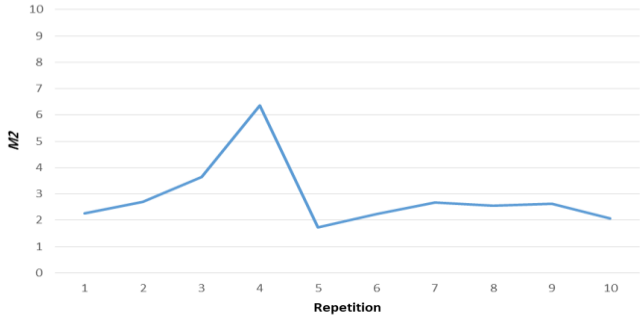
تعداد رفت‌وبرگشت	power(w)	W(m)	M^2
0	100	0.0020	1
1	119.64	0.0022	2.26
2	143.84	0.0023	2.70
3	172.875	0.0026	3.63
4	206.86	0.0039	6.35
5	245.55	0.0020	1.73
6	292.6	0.0022	2.24
7	349.73	0.0023	2.68
8	409.49	0.0025	2.56
9	459.38	0.0025	2.63
10	499.88	0.0021	2.07

در شکل(۳) توزیع شدت موج‌های خروجی بصورت ۲بعدی از ۱تا ۱۰رفت و برگشت، نمایش داده شده است. طبق شکل، در محدوده‌ی ۰ تا ۲/۵ میلی‌متر از محور دیسک توابع توزیع، مشابهت بسیار زیادی با یکدیگر دارند. خط های قرمز عمودی، ناحیه‌ی پمپاژ دیسک را نشان می‌دهند. ناهمگون‌ترین تابع مربوط به مرتبه‌ی ۴ام رفت و برگشت است.



شکل۳: توزیع توابع شدت نسبت به شعاع دیسک از ۱تا ۱۰ رفت و برگشت در داخل تقویت کننده.

درشکل(۴) تغییرات فاکتور کیفیت M^2 نسبت به تعداد رفت و برگشت‌های موج ورودی در تقویت کننده نمایش داده شده است.



شکل(۴) نمودار تغییرات کیفیت باریکه در تعداد عبورهای مختلف.

۴- نتیجه گیری

با مشاهده‌ی جدول(۳) و شکل(۴) مشخص می‌شود، کیفیت موج خروجی برای کمتر از ۴ رفت‌وبرگشت داخل سیستم مطلوب نیست. ولی از ۵ تا ۱۰ رفت‌وبرگشت کیفت پرتو بین مینیمم و ماکزیممی در حدود ۲ تا ۳، در نوسان است. دستیابی به توان حدود 500W با فاکتور کیفیت ۲.۰۷ یک پرتوی پرتوان با کیفیت بالا را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] INJEYAN, Hagop; PFLUG, Georg Ch; VESPUCCI, Maria Teresa. *High Power Laser Handbook*. McGraw-Hill, (2011).

[2] Toroghi, A.Kh. Jafari and A.H. Golpayegani; " The effect of temperature on absorption in end-pumped Yb:YAG thin disk lasers", Optics &LaserTechnology41,800–803, (2009).

[3] Song, Enmao, et al. "The design of thin disk laser multi-pass amplifier." SPIE/COS Photonics Asia. International Society for Optics and Photonics, (2016).

[4] Guangzhi Zhu, Xiao Zhu, Zhongxiong Dai et al.; "Analytical model of optical path difference in an end-pumped Yb:YAG thin-disk laser with nonuniform pumping light", Appl. Opt. ,Vol.54, No.10, 54(10), 3025-31, April (2015).

[5] Jianli Shang, Xiao Zhu, Guangzhi Zhu et al.; "Analytical approach to thermal lensing in end-pumped Yb:YAG thin-disk laser", Appl. Opt., Vol. 50, No. 32, November (2011).

[6] H. Weber; ''Laser Resonators and Beam Propagation'', 2nd edition, Springer, (2004)

[7] J. Alda; "Laser And Gaussian Beam Propagation And Transformation";Enclopedia Of Optical Engineering, Pp.999-1013, October (2001).

[8] Mende, Jens, et al. "Thin disk laser: power scaling to the kW regime in fundamental mode operation." SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2009.V.

[9] Verdeyen, Joseph T. "*Laser electronics*." Laser electronics/2nd edition/, by JT Verdeyen, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1989, 640 p. (1989)

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]