بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی رزوناتور خطی با پایداری دینامیکی برای لیزر دیسک توان بالا

سعید عربکری، محمد آقایی، محمد مهدی مجیداف و محمد حسین دائمی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

چکیده – در این مقاله روشی محاسباتی برای طراحی رزوناتور خطی با پایداری دینامیکی برای لیزر دیسک توان بالا ارائه شده است. نتیجه آزمایش تجربی نشان می‌دهد که با افزایش توان دمش به مرتبه کیلووات قدرت کانونی کنندگی دیسک ($D=1/f$) ۰/۳m^{-1} تغییر می‌کند. برای پایداری دینامیکی رزوناتور، طول رزوناتور و شعاع آیینه خروجی چنان تعیین شد که شعاع لکه لیزری روی دیسک با تغییر شعاع انحنای دیسک تقریبا ثابت بماند. نتایج محاسبات نشان داد که برای استحصال پرتو خروجی با کیفیت پرتو (M^2) کمتر از ۵ باید از دیسکی با R_d~2m استفاده کرد. همچنین با روش ارائه شده مشخصات رزوناتورهای خطی پایدار و نیمه پایدار دینامیکی برای دیسکی با R_d=-15m بدست آمد.

کلید واژه- لیزر دیسک، رزوناتور خطی، روش ماتریسی ABCD، قدرت کانونی کنندگی، کیفیت پرتو

Designing method of dynamically stable linear resonator for high power thin-disk laser

Saeed Arabgari, Mohammad Aghaei, Mohammad Mahdi Majidof and Mohammad Hosein Daemi

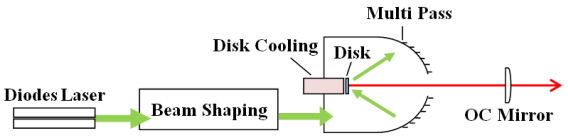
Abstract- In this paper a numerical method for designing dynamically stable linear resonator for high power thin-disk laser is presented. The experimental results indicate that disk dioptric power in the kW regime is changed by 0.3m^{-1}. To obtain a dynamically stable resonator, the length and the output coupler mirror radius are determined such that the beam radius on disk is remained constant as the disk radius varies. The numerical results reveal that in order to obtain a beam quality (M^2) less than 5, disks with R_d~2m must be used. Also by using this method, for R_d~-15m, linear resonators with dynamically and quasi-dynamically stability are designed.

Keywords: Thin-disk laser, linear resonator, ABCD matrix, dioptric power, Beam quality

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

۱- مقدمه

لیزر دیسک با پمپاژ دیودی یکی از لیزرهای نوظهور در حوزه لیزرهای حالت جامد می‌باشد، بطوریکه امکان تولید پرتوهای توان بالا با کیفیت پرتو خوب را ممکن می‌سازد. ماده فعال لیزر دیسک به شکل دیسک نازک با ضخامت تقریبی ۲۰۰ میکرون است که معمولا از Yb:YAG ساخته می‌شود. در لیزر دیسک Yb:YAG، دمش ماده فعال توسط لیزرهای دیودی با طول موج ۹۴۰nm پس از عبور از یک سامانه شکل دهی پرتو انجام می‌شود (شکل ۱). در طراحی رزوناتور این لیزر، همواره با اعمال لایه نشانی بازتاب کامل به پشت دیسک برای طول موج خروجی، از آن به عنوان یکی از آینه‌های رزوناتور استفاده می‌شود. مزیت اصلی رزوناتور لیزر دیسک نازک در مقایسه با مواد فعال میله‌ای شکل، حذف و یا کاهش اثرات حرارتی مضر همچون پدیده دوشکستی و لنز حرارتی است که قابلیت افزایش توان لیزر بدون از دست دادن کیفیت باریکه لیزر را فراهم می‌آورد [۱]. یکی از نکات مهم در ساخت لیزرهای صنعتی، طراحی لیزر با کمترین المانهای اپتیکی ممکن است. به همین دلیل استفاده از رزوناتور خطی در اولویت ساخت این لیزرها قرار دارد. این رزوناتور از دو آینه که یکی از آنها دیسک و دیگری آینه خروجی است، تشکیل می‌شود. در این مقاله ضمن بیان محدودیت‌های طراحی رزوناتور برای لیزر دیسک، روشی برای طراحی رزوناتور خطی با پایداری دینامیکی بالا ارائه می‌شود.



شکل۱. تصویر شماتیک یک لیزر دیسک نازک

۲- طراحی رزوناتور پایدار دینامیکی

یکی از محدودیت‌هایی که در طراحی رزوناتور لیزرهای حالت جامد توان بالا وجود دارد، تغییر شعاع انحنای سطح ماده فعال در دمش‌های مختلف است. این تغییرات ناشی از انبساط گرمایی محیط فعال در اثر افزایش دمای سطح آن است. در لیزر دیسک برای حصول به کیفیت پرتو خوب در توان‌های بالا باید حتما این مساله را در طراحی رزوناتور در نظر گرفت. با دمش محیط فعال به علت اثرات حرارتی شعاع انحنای دیسک کاهش می‌یابد (شکل۲). آزمایش‌ها نشان می‌دهد که معمولا تا اعمال پمپاژی کیلوواتی، قدرت کانونی کنندگی[1] دیسک (عکس فاصله کانونی: $D=1/f$) به اندازه ۱۰٪-۲۰٪ کوچکتر می‌شود [۲]. این موضوع باعث بوجود آمدن تغییرات دینامیکی در شعاع انحنای آینه عقب رزوناتور (دیسک) در بازه جریان کاری لیزر می‌شود. این مساله منجر به آن می‌شود که در طراحی یک رزوناتور مناسب برای لیزر دیسک نتوان از روش متداول استفاده کرد. در روش متداول محدوده پایداری رزوناتور برحسب طول رزوناتور و شعاع آیینه خروجی بدست می‌آید. سپس از میان جواب‌های موجود، رزوناتور با M^2 و حساسیت کمتر انتخاب می‌شود. اما در شرایط موجود باید رزوناتوری با پایدار دینامیکی طراحی شود چرا که با تغییر شعاع انحنای دیسک، قطر لکه روی دیسک تغییر می‌کند و ممکن است یک رزوناتور که در ابتدا پایدار است در ادامه تبدیل به رزوناتور ناپایداری شود. برای طراحی رزوناتور پایدار دینامیکی باید طول و شعاع آیینه خروجی چنان باشند که در محدوده تغییرات انحنای دیسک، قطر لکه روی دیسک نوسانات ناچیزی داشته باشد. به بیان ریاضی باید کمینه منحنی تغییرات قطر لکه روی دیسک (W_d) برحسب قدرت کانونی کنندگی دیسک (D_d)، در قدرت کانونی‌کنندگی کاری لیزر دیسک (D_0) واقع شود (شکل۳). یا به بیان محاسباتی:

$$\left.\frac{dW_d}{dD_d}\right|_{D_d=D_0}=0 \qquad (۱)$$

منظور از D_0 قدرت کانونی کنندگی دیسک در توان دمشی است که معمولا لیزر در آن توان کار می‌کند. برای طراحی رزوناتوری با این شرط، با توجه به خطی بودن رزوناتور می‌توان مساله را به روش تحلیلی حل نمود. از آنجا که قطر لکه رزوناتور چند مدی در فواصل مختلف داخل رزوناتور ضریب ثابتی از قطر لکه TEM_{00} در آن فاصله است لذا معادله (۱) برای قطر لکه مد پایه (W_{00d}) و قطر لکه رزوناتور (W_d) هم ارز است. برای محاسبه قطر لکه مد پایه (W_{00d}) از روش ماتریسی ABCD استفاده شد [۳]. ماتریس رفت و برگشت کامل با مرجع قراردادن

1. Dioptric power

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

صفحه دیسک به صورت زیر است:

$$M_{tot}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ -2/R_d & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & L\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0\\ -2/R_{oc} & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & L\\ 0 & 1\end{bmatrix} \quad (۲)$$

در رابطه بالا L طول رزوناتور خطی و R_{oc} و R_d به ترتیب شعاع انحنای آیینه خروجی و دیسک می‌باشند. با استفاده از روابط حاکم بر رزوناتورهای خطی قطر لکه مد پایه روی دیسک برابر خواهد بود با [۴]:

$$W_{00d}=(\frac{\lambda|R_d|}{\pi})^{1/2}(\frac{L(R_{oc}-L)}{(R_d-L)(R_d+R_{oc}-L)})^{1/4} \quad (۳)$$

که λ طول موج خروجی لیزر است. با استفاده از $D_d=2/R_d$ و $D_{oc}=2/R_{oc}$ خواهیم داشت،

$$\frac{dW_{00d}}{dD_d}\Big|_{D_d=D_0}=0\Rightarrow L_{\pm}=(D_0+D_{oc})\pm(\sqrt{D_0^{\,2}+D_{oc}^{\,2}}) \quad (۴)$$

در رزوناتوری با طول $L_{\pm}$ و قدرت کانونی‌کنندگی آینه خروجی D_{oc}، کمینه نمودار W_{00d} در نقطه D_0 واقع می‌شود. کمیت دیگری که در طراحی رزوناتور باید محاسبه و درنظر گرفته شود کیفیت پرتو خروجی است. نکته کلیدی در محاسبه مقدار M^2 این است که ناحیه دمش روی دیسک به صورت یک روزنه عمل می‌کند چراکه قطر پرتو تشدید شده همواره حداکثر به اندازه قطر لکه دمش خواهد بود. بر این اساس، محاسبات نشان می‌دهد که کیفیت پرتو برابر است با [۱]:

$$M^2=\frac{W_p^{\,2}}{W_{00d}^{\,2}} \quad (۵)$$

در این رابطه W_p قطر لکه دمش و W_{00d} قطر لکه مد TEM_{00} روی دیسک است. بنابراین برای طراحی رزوناتور پایدار دینامیکی، باید آینه‌های خروجی موجود را لیست کرده و سپس با استفاده از رابطه (۴) طول بهینه و کیفیت پرتو را برای هر یک از آینه‌ها بدست آورد. از میان رزوناتورهای موجود مواردی که دارای طول مناسب و کیفیت پرتو بهتری هستند برگزیده خواهند شد.

۲-۱- طراحی رزوناتور با امکان انتخاب دیسک

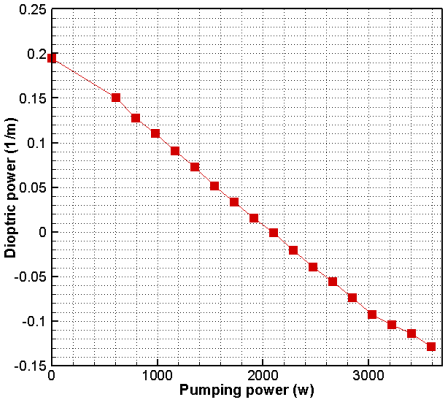
گاهی امکان انتخاب دیسک با قدرت کانونی کنندگی کاری دلخواه (D_0) برای طراحی رزوناتور وجود دارد. در این صورت طراحی رزوناتور با طول و کیفیت پرتو مناسب، ساده‌تر و با محدودیتهای کمتری روبرو خواهد بود. جدول (۱) فهرست تمام رزوناتورهای خطی پایداری دینامیکی را با استفاده از رابطه (۴) و با شرط $L<222cm$ و $M^2<5$ نشان می‌دهد. در این محاسبات دیسک‌های مختلف با D_0 مابین ۲ الی ۲- دیوپتر برای طراحی رزوناتور قابل انتخاب بوده است. نتایج عددی ارائه شده در جدول (۱) نشان می‌دهد که در طراحی رزوناتور خطی با پایداری دینامیکی و طول مناسب و کیفیت پرتو کمتر از ۵ می‌بایست از دیسک‌های با شعاع انحنای کاری ۲متر استفاده کرد.

جدول۱. مشخصات روزناتورهای پایدار دینامیکی ممکن برای دیسک‌های مختلف با شرط L<222cm و $M^2<5$.

$D_0(m^{-1})$	R_d(cm)	R_{oc}(cm)	L(cm)	M^2
۱	۲۰۰	۱۵	۲۰۸	۱/۴۸
۱	۲۰۰	۳۰	۲۱۶	۲/۹۵
۱	۲۰۰	۴۰	۲۲۲	۳/۹۲
۱	۲۰۰	-۱۵	۱۹۳	۱/۴۸
۱	۲۰۰	-۳۰	۱۸۶	۲/۹۵
۱	۲۰۰	-۴۰	۱۸۲	۳/۹۲
۱	۲۰۰	-۵۰	۱۷۸	۴/۸۸

۲-۲- طراحی رزوناتور برای دیسک خاص

گام اول در طراحی رزوناتور پایدار دینامیکی برای یک دیسک خاص، اندازه‌گیری تغییرات قدرت کانونی‌کنندگی دیسک (D_d) در توان‌های دمش مختلف است. شکل (۲) نمودار تجربی این تغییرات را برای یک دیسک خاص اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان محدوده تغییرات D_d و نیز نقطه D_0 کاری دیسک را تعیین کرد. این نقطه برای این دیسک D_0=-0.133m^{-1} در نظر گرفته شده است.



شکل۲. نمودار تجربی تغییرات قدرت کانونی کنندگی دیسک برحسب توان دمش

در گام دوم، طول بهینه رزوناتور پایدار دینامیکی محاسبه می‌شود. نتایج برای L<400(cm) و $M^2<100$ در جدول (۲) ذکر شده است. مطابق جدول (۲) تعداد رزوناتورهای پایدار دینامیکی معدودی برای این دیسک وجود دارد. در

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

این حالت برای افزایش جواب‌ها می‌توان با پذیرش ریسک کاهش میزان پایداری دینامیکی، رزوناتورهای با کیفیت پرتو مناسب را با طول کوتاه‌تر بکار برد.

جدول۲. مشخصات روزناتورهای پایدار دینامیکی ممکن برای دیسک با (D_0=-0.0013(cm^{-1}) و با شرط L<400cm و M^2<100.

	R_d(cm)	D_0(cm^{-1})	R_{oc}(cm)	L(cm)	M^2
۱	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۲۰۰	۱۰۷	۷۹
۲	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۳۰۰	۱۶۵	۵۳
۳	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۴۰۰	۲۲۶	۴۰
۴	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۵۰۰	۲۹۰	۳۲
۵	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۶۰۰	۳۵۷	۲۷

برای این منظور باید طول رزوناتور طوری انتخاب شود که به ازای هر آینه خروجی بکار رفته، نمودار W_d برحسب D_d در نقطه D_0 نزدیک به کمینه باشد. با توجه به خوش‌رفتار بودن این تابع می‌توان نامساوی‌های زیر را برای تحقق این شرط اعمال کرد،

$$\left|\frac{dW_{00d}}{dD_d}\Big|_{Dd=Di}\right| \le 0.03 \quad \text{و} \quad \left|\frac{dW_{00d}}{dD_d}\Big|_{Dd=Df}\right| \le 0.2 \qquad (۶)$$

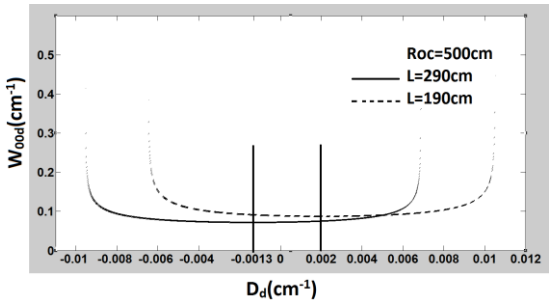
$$\left|\frac{W_{00d}(D_f)-W_{00d}(D_i)}{W_{00d}(D_f)}\right|\times 100 \le 7 \qquad (۷)$$

D_i=0.002cm^{-1} و D_f=-0.0013cm^{-1} به ترتیب، قدرت کانونی‌کنندگی این دیسک در ابتدا و انتهای ناحیه دمش دیسک است و واحد مشتق‌ها (cm^{-2}) است. جدول (۳) جواب‌های گزینش شده را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر این جدول با جدول (۲) ملاحظه می‌شود که طول برخی از رزوناتورها تا ۱متر کاهش یافته است.

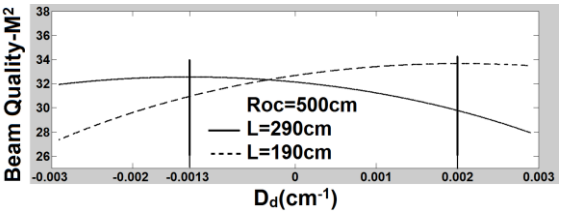
جدول ۳. مشخصات رزوناتورهای گزینش شده نیمه پایدار دینامیکی

	R_d(cm)	D_d(cm^{-1})	R_{oc}(cm)	L(cm)	M^2
۱	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۴۰۰	۱۶۰	۳۹
۲	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۵۰۰	۱۹۰	۳۰
۳	-۱۵۰۰	-۰/۰۰۱۳	۶۰۰	۲۱۵	۲۵

شکل (۳) نمودار تغییرات W_{00d} برحسب D_d را برای رزوناتور شماره (۲) جدول (۳) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود در محدوده تغییرات D_d، شعاع مد پایه برای رزوناتور با طول کوتاهتر همچنان نزدیک به کمینه منحنی یا همان حالت پایدار دینامیکی باقی می‌ماند. شکل (۴) نیز نمودار تغییرات کیفیت پرتو برحسب قدرت کنندگی دیسک را برای این دو رزوناتور نشان می‌دهد. داده‌های این شکل نشان می‌دهد که M^2 برای رزوناتور کوتاه شده، در ناحیه کاری دیسک ۸٪ تغییر می‌کند که ثبات قابل قبولی برای یک لیزر دیسک است.



شکل۳. نمودار تغییرات شعاع لکه مد پایه روی دیسک نسبت به قدرت کانونی‌کنندگی دیسک برای یک رزوناتور پایدار دینامیکی و رزوناتور کوتاه شده آن با پایدار دینامیکی کمتر.



شکل ۴. نمودار تغییرات کیفیت پرتو برحسب قدرت کانونی‌کنندگی دیسک برای رزوناتور پایدار دینامیکی و رزوناتور کوتاه شده آن.

۳- نتیجه گیری

در لیزر دیسک نازک، شعاع انحنای دیسک به عنوان آینه پشتی رزوناتور خطی متغیر است. با استفاده از معادلات حاکم بر رزوناتورهای خطی، رزوناتورهایی با پایداری دینامیکی و کیفیت پرتو مناسب می‌تواند برای این لیزر طراحی شود. محاسبات نشان می‌دهد برای استحصال پرتو خروجی در رزوناتور خطی با کیفیت پرتو کوچکتر از ۵ و طول مناسب، می‌بایست از دیسکی با شعاع انحنای تقریبی ۲متر در پمپاژ کاری لیزر استفاده کرد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که می‌توان طول برخی از رزوناتورهای پایدار دینامیکی با M^2 کوچک اما طول بزرگ را به حد قابل قبولی تقلیل داد به طوری که همچنان نزدیک به حالت پایداری دینامیکی عمل کند.

مراجع

[1] C. Stewen, et al, *A 1-kW CW Thin Disk Laser*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 4, p. 650, (2000).

[2] Y. H. Peng, et al, *Near fundamental mode 1.1kW Yb:YAG thin-disk laser*, Optics Letters, Vol. 38, No.10, p. 1709, (2013).

[3] N. Hodgson, H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation*, Second Edition, Springer, (2005)

[4] W. Keochner, *Soldi-State Laser Engineering*, Sixth Revised and Updated Edition, Springer, 2006.

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