

مجله علوم و فنون هستهای، جلد ۹۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 91, No 1, 2020



توانافزایی نظاممند با تشدیدگرهای Nd:YAG پایدار دینامیکی در کارکرد لیزری تک مد عرضی

داود رزاقی، محمدرضا مقدم*، مرتضی ساسانی قمصری

پژوهشکدهی فوتونیک و فناوریهای کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹–۱۴۱۵۵، تهران _ ایران

مقالهی پژوهشی تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۸/۲۸ تاریخ یذیرش مقاله: ۹۸/۴/۱۵

چکیدہ

در این پژوهش به موضوع افزایش نظاممند توان لیزر Nd:YAG با حفظ کیفیت باریکه خروجی و عدم افزایش حساسیت به تنظیم پرداخته شده است. در ابتدا با استفاده از مدل توان انکساری توزیعیافته و نرمافزار GLAD، یک تشدیدگر مبنای تک میلهای پیشنهاد شد که به صورت دینامیکی پایدار است، در مقایسه با همتای تخت متقارن خود، از حجم مد اصلی بالاتری (حداقل دوازده برابر) برخوردار بوده و در عین حال حساسیت به تنظیم یکسانی دارد. در ادامه به دلیل محدودیت توان دمشی حین توانافزایی، از تشدیدگرهای چند میلهای تناوبی مبتنی بر یک طرح مبنا استفاده شده است. کارآیی تشدیدگرهای تناوبی در توانافزایی تک مد، به واسطه افزایش حجم مد اصلی لیزر، مورد آزمون و بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی از طریق یک تشدیدگر لیزری دو میلهای مورد تأیید قرار گرفته است. نتایج این پژوهش میتواند برای بالا بردن توان لیزرهای Nd:YAG تک مد عرضی، بدون کاستن از کیفیت پرتوی خروجی و ایجاد حساسیت به تنظیم بیشتر، مفید باشد.

كليدواژەھا: تكمدسازى عرضى، توان افزايى، تشديدگرهاى ليزرى پايدار ديناميكى

Systematic power scaling of dynamically stable Nd:YAG resonators in single-transverse-mode laser operation

D. Razzaghi, M.R.Moghaddam*, M. Sasani Ghamsari

Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Abstract

The present research deals with the investigation of systematic power scaling of Nd:YAG laser systems by preserving the beam quality and misalignment sensitivity. Firstly, by using the distributed refractive power model and the GLAD software, a single dynamically stabilized rod was proposed. The proposed resonator, in comparison with its flat symmetric counterpart, showed a higher fundamental mode volume (at least twelve times) and exhibited the same amount of misalignment sensitivity. Then, due to the limitation of increasing the pumping power in the process of power scaling, the periodic multi-rod resonators, were used based on a basic dynamic stable resonator. Effectiveness of periodic resonators in fundamental mode power scaling have been investigated because of increment of the fundamental mode volume. The results of the investigation have been validated via a two-rod periodic laser resonator. The results can be useful for power scaling of single transverse mode Nd:YAG lasers, without degrading the beam quality and generating more misalignment sensitivity.

Keywords: Single transverse-mode operation, Power scaling, Dynamically stable laser resonators

*Email: mabdolhoseini@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

بالا بردن توان لیزرها با تأثیر ناچیز بر کیفیت باریکه خروجی و نیز حفظ میزان حساسیت تشدیدگر به اختلالاتی چون ناترازمندی، همواره در کانون توجه پژوهشگران این حوزه بوده است [۱–۵]. اصولاً توانافزایی به چند روش ممکن است: ۱) پوشش باریکههای با واگرایی یکسان کنار هم، ۲) جفتشدگی باریکه از طریق قطبش یا ترکیب طیفی خروجی لیزرها و یا از طریق ترکیب باریکههای- همدوس، ۳) بزرگ کردن سطحمقطع محيط بهره، ۴) افزايش تعداد يا طول محيط بهره در یک تشدیدگر (به دلیل محدودیت اعمال توان دمش یکباره) و ۵) طرحهای نوسانگر- تقویت کننده. روش اول به کاهش کیفیت باریکه منجر می شود. در روش دوم به تعداد قطعات اپتيكى افزوده مىشود. در روش سوم با هندسه دیسکی، تا جایی که تنش مکانیکی و گسیل خودبهخودی-تقویت شده عرضی، توان خروجی از یک تک دیسک را محدود نکند، توانهای دمش، توان انکساری عدسی گرمایی و خروجی (متناسب با سطح مد) قابل افزایش است. در روش سوم برای هندسه میلهای و تشدیدگر پایدار، اگرچه تشکیل سطح دمش بزرگ، به کاهش توان انکساری عدسی گرمایی و شاید حجم مد اصلی بزرگ، منجر شود ولی در توانهای بالا، هرگونه نوسان در عدسی گرمایی، میتواند به نوسانات گسترده در خواص مدی، در توزیع انرژی بین مدهای عرضی و در سایر مشخصات خروجی و حتی توقف عمل لیزری منجر شود.

در روش چهارم برای هندسه فیبری، اثرات غیرخطی محدودیت توانی ایجاد میکنند. در روش چهارم در هندسه میلهای با افزایش تعداد میلهها در تشدیدگرهای ناپایدار حالت جامد، کیفیت باریکه خروجی کاهش یافته [۶] ولی در تشدیدگرهای پایدار – تناوبی، کیفیت باریکه بهبود خواهد یافت. در روش پنجم در رژیم کاری پیوسته، بهره Nd:YAG، تقویت گری مؤثری را در خارج تشدیدگر نتیجه نمیدهد. بدینترتیب بهبود کیفیت باریکه و افزایش توان به جز از طریق تشدیدگر حاصل نمی شود.

بدین ترتیب توجه خود را معطوف به افزایش نظاممند حجم مد و کیفیت باریکه در یک تشدیدگر پایدار مبنا خواهیم کرد که با تناوبیسازی آن، توان بهصورت نظاممندی افزایش یابد. این ارتقاپذیری قاعدهمند باید بدون استفاده از طرحهای پیچیده یا تأثیرگذاری منفی روی پارامترهای دیگر حاصل شود. در این پژوهش با نرمافزار MATLAB و مدل توان انکساری

توزیعیافته برای میله، یک چینش نامتقارن کوژ- کوژ، که با استفاده از آن حجم مد اصلی تا ۱۲ برابر نسبت به تشدیدگر تخت- متقارن افزایش یافته است، مبنای کار قرار خواهد گرفت. برای این طرح مبنا پایداری دینامیکی، حساسیت به تنظیم، تناوبیسازی چینش، پروفایل خروجی و صحت محاسبات عددی برای این طرح مبنا از طریق نرمافزار GLAD مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با رسم منحنیهای مختلف، قواعد حاکم بر ارتقاء توانی و کیفیتی به نمایش گذاشته میشود. نقاط کاری مدنظر، همگی براساس مشخصات واقعی کاواکهای دمیده از پهلو و میلههای قابل ساخت داخلی انتخاب شده است [۷–۸].

۲. مبانی نظری

به طور کلی اثرات بار حرارتی باعث ایجاد یک پروفایل عرضی برای ضریب شکست در میله، تغییرات تختی سطوح انتهایی میله لیزری و در مجموع ایجاد عدسی حرارتی معادل، میشود. ABCD به طور کلی هر سیستم اپتیکی با ماتریس انتقال ABCD میتواند به صورت یک عدسی معادل شود. در واقع اگر فواصل از صفحات اصلی پشت صفحات ورودی و خروجی سنجیده شوند، فاصله کانونی $\frac{1}{C} = F$ خواهد بود که خارج صفحات اصلی خود ($\frac{1-D}{C}$) قرار گرفته است [۹، ۱۰]. مکان این صفحات با توان به صورت سینوسی تغییر میکند [۱۱]. برای میله لیزری با دمش جانبی، عنصر C در این ماتریس به صورت زیر به توان الکتریکی چشمه دمش $\frac{P}{E}$ مرتبط است:

$$C = -n_{\circ}\Gamma\sin\Gamma\ell - \tau D_{E}\cos\Gamma\ell + D_{E}^{\tau}\frac{\sin\Gamma\ell}{n_{\circ}\Gamma}$$
(1)

که در آن

$$-D_E = \frac{(1 - n_{\circ})\alpha RP_E \eta_H}{\gamma KA \,\ell} \tag{(7)}$$

و

$$\Gamma = \frac{\mathbf{r}}{b} = \left(\frac{\mathbf{v}}{n_{\circ}\ell A}\right)^{\frac{1}{\mathbf{r}}} \left(P_{E}\right)^{\frac{1}{\mathbf{r}}} \left[\frac{\eta_{H}}{K} \left(\frac{\mathbf{v}}{\mathbf{r}}\frac{dn}{dT} + \alpha C_{r},_{\varphi}n_{\circ}^{\mathsf{r}}\right)\right]^{\frac{1}{\mathbf{r}}}$$
(**r**)

است. اثر انحنای سطوح انتهایی و عدسی آن، از طریق توان انکسار D_E و اثرات ناشی از حرارت یا تنش، از طریق Γ به توان دمش وابسته می شوند. در این روابط n ضریب شکست میله، و

۱۳۸

م و dn/dT به ترتیب مقدار و تغییرات آن با دما در مرکز C_r , و C_r , میله میباشند. همچنین K ضریب هدایت حرارتی، ضرایب فوتوالاستیک ماده و α ضریب انبساط حرارتی است. در یک برآورد تقریبی، معکوس فاصله کانونی یا توان انکساری عبارتست از:

$$D(m^{-1}) = f^{-1} = \frac{dn}{dT} \times \frac{P_{heat}}{\tau KA} \propto P_{in}(kW)$$
 (*)

در این رابطه P_{heat} توان هدر رفته و A سطحمقطع ناحیه دمش است [۱۲]. این تابعیت توانی، به چشمه دمش، هندسه و توزیع شدت دمش بستگی دارد [۱۳، ۱۴]. رابطهی (۴) نشان میدهد که هم شاخص شایستگی عددی محیط بهره برای میدهد که هم شاخص شایستگی عددی محیط بهره برای توانهای بالا (یعنی $\frac{h}{dT} \times \frac{h}{k}$) و روند تولید توان گرمایی توانهای باید کوچک نگاه داشته شود.

۱.۲ معادلسازی تشدیدگرها

برای تحلیل یک تشدیدگر دارای عدسی گرمایی داخلی، ماتریس انتقال تک عبورِ معرف پارامترهای تعمیمیافته تشدیدگر (یعنی *gi و*L) و یا معرف پارامترهای معادلساز آن با یک تشدیدگر بدون اجزای داخلی، عبارتست از [۱۵]:

$$M = \begin{pmatrix} g_{1}^{*} & L^{*} \\ g_{1}^{*}g_{Y}^{*} - 1 \\ \frac{g_{1}^{*}g_{Y}^{*} - 1}{L^{*}} & g_{Y}^{*} \end{pmatrix}$$
 (Δ)

تساوی مقادیر متناظر از این پارامترها در دو تشدیدگر، به معنی ۱) وضعیت یکسان شرایط پایداری $1 \ge {g_{1}^{*}g} \ge 0$ ، ۲) مقادیر یکسان اندازه لکههای مد اصلی روی آینههای متناظر [18]، ۳) روابط یکسان، برحسب پارامترهای تعمیمیافته ستارهدار و پارامترهای بدون ستاره یا بدون عدسی داخلی خواهد شد. برای کارکرد مولتی مد با افزایش قطر میله، طول میله و تعداد میلهها، توان را میتوان افزایش داد. در این شرایط باید انتظار داشت که کیفیت باریکه خروجی هم تخریب شود و حجم مد اصلی در همه میلهها یکسان نباشد. برای رفع این

۲.۲ تشدیدگرهای تناوبی

تناوبی بودن شامل تساوی توانهای انکساری (D_i=1/f_i) در تمام میلهها است. از لحاظ ریاضی، *g_i به همراه دیگر عناصر ماتریس عبور، از عناصر ماتریس انتقال تشدیدگر تکمیلهای

مبنا، با به کار بردن تئوری سیلوستر قابل محاسبه میباشند [1Y]. به عبارت دیگر، ماتریس منتج M^n از ماتریس مبنا M^n از M^r : $M = \begin{bmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{bmatrix}$

$$M_{one trip}^{n} = \begin{bmatrix} \cos n\theta & \frac{b' \sin n\theta}{\sin \theta} \\ \frac{c' \sin n\theta}{\sin \theta} & \frac{\cos n\theta}{\cos \theta} \end{bmatrix}$$
(9)

 $\cos \theta = \frac{a'+d'}{r} = \frac{g_1^* + g_r^*}{r} = \frac{cos}{r} + \frac{b'}{r} = \frac{cos}{r}$ می اشد و به $\cos \theta$ می اشد و به $\sin \theta = 0$ می اشد و به $\sin \theta = 0$ می اشد و به $\sin \theta = 0$ می اشد و به n وابسته است. برای ساخت یک تشدیدگر تناوبی از تشدیدگر مبنا (به استثناء چینش مبناء تخت - تخت) معمولاً به عدسی های داخلی اضافی، نیاز است (شکل ۱). در عمل، بعداد هدها (یا چمبرهای دمشی) قابل استفاده توسط فاکتورهای کاری محدود می شوند.

۳۰۲ پایداریسازی دینامیکی برای کارکرد تک مد عرضی

در هر توان انکسار دل خواه از میله، به غیر از توانهای انکساری بحرانی، میتوان اندازه لکه در کل تشدیدگر را برای مد اصلی محاسبه و این اندازه لکه را برای کارکرد مولتی مد، به کمک پرشدگی مدهای مرتبه بالاتر تا شعاع میله، محاسبه کرد. توانهای انکساری بحرانی که هریک از عناصر ماتریس انتقال کل را صفر کند، تشدیدگر را در مرز ناحیه ناپایداری قرار میدهد. با تقریب عدسی ضخیم حرارتی، برای ۱=n حداکثر تا چهار توان انکسار بحرانی و تا دو ناحیه پایداری که میتوانند به هم متصل باشند، با یک مسیر خطی تحول وجود دارد. در پژوهشهای قبلی این نویسندگان [۱۹، ۲۰]، به گستره توانی پایداری تشدیدگرهای تک میلهای و چند میلهای پرداخته شده



شکل ۱. ساخت یک تشدیدگر تناوبی از تشدیدگر مبنا.

برای پایداریسازی دینامیکی تشدیدگرها در عملکرد تک مد عرضی، باید مشتق اندازه لکه مد اصلی در (هر) میله نسبت به توان انکساری آن صفر شود تا نوسانات عدسی گرمایی بر روی اندازه مدها اثر نگذارد [۲۱]. برای افزایش توان و برای داشتن بهره بالا، همواره باید حجم مد اصلی داخل میله را هر آنچه ممکن است بزرگتر کرد [۲۲]. میتوان یک عامل حساسیتپذیری $S_i = \rho_i (w \alpha_i)^{-1}$ برای آینه iام تعریف $S_i = \rho_i (w \alpha_i)^{-1}$ کرد که در آن ρ_i جابه جایی محور مد بر روی میله، به سبب چرخش زاویهای α_i باشد. چون در شرایط پایداری دینامیکی، ... w اندازه لکه پایدار شده در میله کند تغییر است، S_i از اندازه لکه روی میله تأثیر قابل توجهی نمی پذیرد. بدیهی است که حساسیت کلی به صورت ($S_{\lambda}^{\gamma} + S_{\tau}^{\gamma}$) تعریف می شود $S = \sqrt{(S_{\lambda}^{\gamma} + S_{\tau}^{\gamma})}$ [۲۳]. از میان دو ناحیه ممکن پایداری I و II، ناحیه پایداری که حساسیت S در یکی از لبههای آن به سمت بینهایت میل میکند با II مشخص می شود. مناسب تر است که از قرار گیری در ناحیه II به خاطر افزایش فزاینده S با تغییر f، پرهیز شود. یعنی جای دهی توان (انکساری) کاری در ناحیه I پایداری ارجح است زیرا مقدار حساسیت به تنظیم در آن ناحیه، یک مرتبه عددی از مقدار آن در ناحیه II کوچکتر است. بدین ترتیب، برای تعیین چهار درجه آزادی (Ri, di)، در یک توان کاری مشخص D_{tot}=I/f، چهار شرط زیر میتوانند در رسیدن به یک جواب معقول كمك كننده باشند: توان ورودى (يا توان انكسارى معین)، شعاع میله ۱٬۲ تا ۲ برابر اندازه لکه بر روی میله، طول مشخص تشدیدگر مبنا $L = d_1 + d_2$ ، و در نهایت داشتن کمینه S در توان انکساری مورد نظر با قرارگیری در ناحیه پایداری I. شرط دوم برای نسبت شعاع میله به اندازه لکه مد اصلی روی آن، تضمین کننده اتلاف پراشی بالاتر از بهره برای مدهای غیر و حذف آنها حین شکل گیری باریکه است که TEM_{00} کدنویسی در نرمافزار Glad این موضوع را تأیید خواهد کرد.

۳. یافتهها و بحث

برای هر دو تقریب عدسی نازک و ضخیم و برای ۱=n، تحول توانی در یک چینش خطی دلخواه، به یک تغییر موقعیت در فضای پایداری *gi با یک مسیر خطی منجر خواهد شد. با یک مدل DPR تحول توانی در همان تشدیدگرها به صورت یک مسیر حلزونی با تعداد زیادی نقطه برگشت در خارج حوزه پایداری است. در عمل برای یک میله Nd:YAG نقاط کار تجربی، میان همان دو منطقه اول از نواحی پایداری محدود خواهد شد. شکل ۲ اثر تغییر شعاع انحنا سطوح مختلف در تشدیدگر و افزایش طول تشدیدگر را نشان میدهد. برای یک تشدیدگر غیرمتقارن، رفتار نقاط تجربی با رفتار پیشبینی شده از تئوری تطابق خوبی دارد. این دادهها حاصل ساخت یک لیزر N۰۰ W

در ۱/f(mm)<۰٬۰۰۳ یا ناحیه عدسی گرمایی ضعیف، بهدلیل جبران کافی عدسی گرمایی توسط انحنادهی به میله، تشدیدگرهای غیر هم طول تخت- متقارن با میلههای انحنادار، دارای کیفیت باریکه نزدیک به هم هستند. این رفتار توسط اندازه گیریهای تجربی تأیید شده است [۲۴].



شکل ۲. اثر شعاع انحنا و افزایش طول سطوح مختلفِ المانهای اپتیکی تشدیدگر و افزایش طول آن در منحنی کیفیت- توان.

بايد توجه داشت كه غيرتخت كردن متقارن سطوح انتهايي میلهی لیزری، کیفیت باریکه را فقط در توانهای پایین بهبود می بخشد. در حالی که افزایش طول تشدیدگر، کیفیت باریکه را در توانهای بالاتر نیز بهبود میدهد. بنابراین اگرچه انتخاب طولهای کوچک از تشدیدگر برای ایجاد تپهای کوتاهتر و داشتن پهنای باريکی از خط مفيد است، ولی اين انتخاب به قیمت افت کیفیت عرضی باریکه و کاهش حجم مد اصلی داخل میله تمام خواهد شد. برای اجتناب از این مشکل، میتوان شعاع انحنای آینهها (ی فوکوسکننده) را بزرگتر انتخاب کرد ولی انحراف زاویهی یک آینه مثلاً مقعر با شعاع انحنای بزرگتر، به انتقال عرضی بزرگتری برای مد، یا حساسیت به تنظیم بیشتری منجر خواهد شد. این حساسیت به تنظیم، هنگامی که از اندازههای روزنه و قطعات اپتیکی با دهانه کوچکتر و یک چینش فشردهتر استفاده شود، شدیدتر بروز ميكند. بدينترتيب فشردكي آرايش الزاماً به معنى پایداری آن نیست. شاید به نظر برسد این حساسیت به تنظیم با یک طرح اپتیکی در ناحیه I پایداری، کاهش یابد. ولی طراحی در ناحیه I یا به معنی انتخاب یک طول تشدیدگری بزرگتر و یا داشتن اندازه لکه کوچکتر بر روی آینهها است. بنابراین به ناچار همواره باید به ناچار بین جنبههای متضاد تصميم گرفت. بهعنوان مثال يا به دنبال تک مدسازي عرضي و توانافزایی بود و یا تک خطسازی.

در ادامه یک تشدیدگر پایدار دینامیکی λ =۱۰۶۴ nm با توان انکساری (۳۰cm) و یک توان دمش ۸۰۰W، بر طبق بخش ۲، طراحی و مبنا قرار میگیرد که در آن میله لیزری به قطر mm و طول ۱۰۰ mm در یک طول دمش مؤثر ۶۵ mm به بهره میرسد (شکل ۳). کارکرد تک مد عرضی با طول فیزیکی ۵۲۰mm از تشدیدگر مبنا، با آرایشهای مختلف (di, Ri) امکان پذیر است. در همه آرایشهای ممکن، توانهای اپتیکی کرانی ناحیه II تغییر میکند. در حالیکه توانهای بحرانی ناحیه I ثابت هستند. مقدار توان انکساری به عبارت دیگر کاری مدنظر، در وسط این ناحیه تنظیم شده است تا حساسیت به اختلالات گرمایی و مکانیکی در آن کمینه باشد (شکل ۵). شرط آخر در نظر گرفتن نسبت ۱٬۶۶ برای قطر لکه در میله به قطر میله است (اندازه لکه یکسان روی میله صرفنظر از ترکیب انتخاب شده). تفاوت همگی این آرایشها در حساسیت به تنظیم، اندازه لکه تا اینهها و واگرایی خروجی است.



شکل ۳. تشدیدگر پیشنهادی مبنا با یک میله.

به عبارتی همگی آنها دارای یک کیفیت باریکه M^{γ} میباشند. از آنجا که رسم منحنیهای حساسیت به تنظیم (S و یا $S_{1/7}$)، برحسب مکان میله نشان داد که حساسیت به تنظیم، با افزایش d_1 کاهش مییابد، براین اساس مکان میله در طرح مبنا به صورت d_1 =470 انتخاب شد. مقادیر شعاع آینهها براین اساس A^{γ} و A^{γ} به دست آمد.

در شکلهای بعدی، طول همه بازوها، شعاع انحنای همه آینهها و فاصله کانونی عدسیهای داخلی با یک ضریب تناسب مثل K افزایش داده می شود و مشخصه های لیزری برای چند مقدار مختلف از K، با یکدیگر مقایسه می شوند. این بدین معنی است که محیط بهره باید به گونهای برای توانافزایی در \mathbf{K}^{-1} نظر گرفته شود که، توان انکساری اپتیکی آن متناسب با کاهش یافته باشد. برآوردن این شرط برای هندسه دیسک آسان است. برای هندسه میلهای با ایجاد سطوح مقعر در دو سطح انتهایی میله و به کارگیری توزیعهای شدت دمشی خاص در میله، توان انکساری تا ٪۵۰ قابل کاهش است. نتایج اثربخشى اينكار قبلا به صورت تجربى مورد آزمون قرار داده شده است که نتایج شکل ۲ را تأیید میکند [۱۳]. شکل ۴ نشان میدهد از جنبه افزایش اندازه لکه مد اصلی روی میله، مقیاس پذیری با این قاعده به خوبی انجام پذیر است؛ زیرا بزرگترین اندازه لکه درون میله شکل می گیرد و مقدار آن در میله تقریباً با جذر K بهصورت $\mathrm{K}^{1/8} \times \mathrm{K}^{1/8}$ قابل رشد است. با دقت بیشتر در تعیین فواصل صفحات اصلی، توان در این رابطه به ۰٫۵ نزدیکتر می شود؛ یعنی سطحمقطع مد اصلی متناسب با K افزایش می یابد و داشتن مقطع بزر گتری از باریکه به معنی ثابت ماندن شدت حین ارتقا سیستم آن است. بدين ترتيب افزايش توان خروجي با فاكتور K^۲ يا مجذور قطر محیط بهره امکانپذیر است. اگر توانهای انکساری برای

۱۸ S = ١/٧ S=: 1/V ناحيه پايدار; 18 S = 1/8 S= YA ناحبه|| Ž 1,6 ناحيه | ١,٢ •,••1 ۰...۵ ... • .• ٣ \/f(mm)

شکل ۶. M' برای دو مقدار مختلف از K در دو گستره پایداری.

 d_1 با توجه به شکل ۷، به استثناء انتخابهای بزرگ از d_1 ، حساسیت به تنظیمات اپتیکی در شرایط پایداری دینامیکی، حین مقیاس دهی افزایش مییابد که برای مقادیر بزرگتری از d_1 محسوس نیست.

در شکلهای ۸ و ۹ حین توانافزایی با افزایش K، حساسیت به تنظیم به ازاء انحراف زاویهای یکسان در یکی از آینهها، با هم مقایسه شده است. در این مقایسه طرح مبنای شکل ۳ و قطر یکسان از میله لیزری در نظر گرفته شده است.

این شکلها نشان میدهند که نرمافزار Glad نیز نتایج شکل ۷ را تأیید میکند. شکلهای ۸ و ۹ نشان میدهند که با دو برابر شدن فاکتور K، اندازه لکه خروجی گوسی ۲ $\sqrt{7}$ برابر و سطحمقطع باریکه آن دو برابر میشود. از طرف دیگر، نتایج شکل ۱۰ تأیید میکند که اگر طول موج لیزر با تغییر ماده فعال و لایههای اپتیکی دو برابر شود. دو برابر شدن سطح مقطع مد اصلی روی آینه خروجی یا میله امکانپذیر است. این خود یعنی کیفیت باریکه قابل بهبود است. در این شرایط شاهد، کاهش همزمان حساسیت به تنظیم بهجای افزایش آن نسبت به خطاهای زاویهای با فاکتور K افزایش دهیم. برای نسبت به خطاهای زاویهای با فاکتور K افزایش دهیم. برای طول موج m ۲ میتوان از محیط لیزری CTH:YAG یا Tm:YAG

قاعده ارتقا با تغییر λ، بدون تغییر R_i ،d_i و توان انکساری میله، برای هر آرایش تشدیدگری دلخواه (پایدارشده یا نشده دینامیکی) صادق است (شکل ۱۱).

برای مشخصههای تشدیدگری مثال زده شده، پر شدن قطر میله در بالاترین مد، در هر دو طول موج به یک شکل انجام میشود (شکل ۱۲). مقیاس دهی، به صورتی که توضیح داده شد قابل تنظیم باشند، نواحی پایداری تشدیدگر برحسب توان شکست گرمایی برای آرایش های ممکن مختلف از طراحی (i, Ri) و مقادیر متفاوت K، در شکل ۵ رسم شده است. ناحیه محصور بین دو منحنی مجاور متعلق به ناحیه II، و ناحیه محصور بین دو خط مجاور متعلق به ناحیه I است. کیفیت باریکه یا ^۲M در طرح پیشنهادی برای دو مقدار مختلف از K در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. شکل های ۴ و ۶ نشان می دهد که با افزایش K، حجم مد اصلی و کیفیت باریکه خروجی ارتقا مییابد.







شکل ۵. توانهای شکست بحرانی برای مکانهای مختلف از میله به ازاء مقادیر مختلف K.



شکل ۷. منحنی حساسیت به تنظیم در تشدیدگرهای پایدار دینامیکی و تغییرات آن هنگام توان فزایی.



 \cdot ،
۷ λ حساسیت به ترازمندی در طرح مبنا
 k=1برای انحراف λ .

 k - مسلم k , R
 $R_{\rm r}$.



 \cdot ،
V λ انحراف k = ۲ ماسیت به ترازمندی با توان افزایی برای
 k = ۲ ماسیت به ترازمندی با توان $k_{\rm r}$.
 R



شکل ۱۰. انحراف زاویهای یکسان برای آینه R_r λ_r در طول موج اصلی و λ_r λ_r در طول موج اصلی (k = 1).



شکل ۱۱. مقایسه افزایش اندازه لکه مد اصلی در طرح مبنا و تخت- متقارن با افزایش λ بدون تغییر توان انکساری میله.



شکل ۱۲. مقایسه اندازه لکه بزرگترین و بالاترین مد ممکن در تشدیدگرهای تخت متقارن و مبنا برای دو طول موج مختلف *λ*.

در تشدیدگر پایدار دینامیکی، بالاترین مد همان مد اصلی است؛ در صورتیکه اختلاف زیادی بین اندازه بالاترین مد و اندازه مد اصلی برای تشدیدگر تخت متقارن وجود دارد. با تقسیم بار حرارتی روی چند میله، تنها با ساختارهای تناوبی میتوان ضمن بالا نگاه داشتن حجم مد در همه میلهها، کیفیت میتوان ضمن بالا نگاه داشتن حجم مد در همه میلهها، کیفیت میتوان ضمن بالا نگاه داشتن حجم مد در همه میلهها، کیفیت میتوان ضمن بالا نگاه داشتن حجم مد در همه میله از با می می دو از های تشدیدگر ساده تخت- متقارن (۲۰ mm اندازه لکه هر دو میله به قطر ۳m ۶ یکسان نگاه می دارد، ولی اندازه لکه مد اصلی را در میلهها به شعاع میله نزدیک نمی کند.

در شکل ۱۴ تحول توانی واگرایی را در این تشدیدگر تناوبی ساده (با آینههای تخت) برای کارکرد تک مد عرضی و مولتی مد با یکدیگر مقایسه شده است. علیرغم به کارگیری دو محیط بهره، مدهای مرتبه بالاتر حضور مؤثر و تخریبگری در کاهش کیفیت باریکه دارند. علامت نقطه در شکل مقادیر تجربی را به ازاء ۴۵۰ mm نشان میدهد.

شکلهای ۱۵ تا ۱۷ توزیع میدان روی آینه خروجی و در فاصله ۱۰ متر از آن را برای یک تشدیدگر مبناء و دو میلهای تناوبی ساخته شده از آن نشان میدهند. طبق انتظار، نمایه انتشار گوسی و اندازه لکه روی آینه خروجی با تناوبی شدن ثابت میماند.



شکل ۱۳. اندازه لکه مد اصلی و بالاترین مد (پر شده تا قطر میله) برای f = ۳۵۰ mm تشدیدگر تخت- متقارن پایدار- تناوبی دو میلهای λ = ۱۰۶۴ nm



\/f (mm)

شکل ۱۴. مقایسه واگرایی برای مد اصلی و بالاترین مد در یک تشدیدگر (پایدار) دو میلهای تخت- متقارن، تناوبی با طول موج nm ۱۰۶۴.



شکل 1۵. نمایه گوسی روی آینه خروجی در تشدیدگر مبنا پیشنهادی.



شکل ۱۶. نمایه و اندازه لکه کاملاً یکسان روی آینه خروجی تشدیدگر پیشنهادی پریودیک با دو میله.



شکل ۱۲. نمایه گوسی و اندازه لکه در فاصله ۱۰ متری از تشدیدگر دومیلهای پریودیک پیشنهادی.

جلد ۹۱، شماره ۱

- 5. D. Naidoo, I.A. Litvin, A. Forbes, *Brightness* Enhancement in a Solid-State Laser by Mode Transformation, Optica. 5, 836 (2018).
- N. Hodgson, G. Bostanjoglo, H. Weber, Multirod Unstable Resonators for High-Power Solid-State Lasers, Applied optics. 32, 5902 (1993).
- F. Hajiesmaeilbaigi, et al. Design and Construction of a 110 W Green Laser for Medical Application, Optics & Laser Technology. 43, 1428 (2011).
- F. Hajiesmaeilbaigi, et al. *High-Average-Power* Diode-Side-Pumped Double Q-Switched Nd: YAG Laser, Laser Physics Letters. 4, 261 (2006).
 A.E. Siegman, Lasers, (Mill Valley, CA, 1986).
- 9. A.E. Siegman, *Lasers*, (Mill Valley, CA, 1986).10. R. Weber, B. Neuenschwander, H.P. Weber,
- *Thermal Effects in Solid-State Laser Materials, Optical Materials.* **11**, 245 (1999).
- 11. B. Struve, et al. *Thermal Lensing and Laser Operation of Flash lamp-Pumped Cr: GSAG*, Optics Communications. **65**, 291 (1988).
- W. Koechner, Michael Bass, Solid-State Lasers: A Graduate Text (Springer Science & Business Media, 2006)
- F. Hajiesmaeilbaigi, et al. Experimental Study of a High-Power CW Diode-Side-Pumped Nd: YAG Rod Laser, Laser Physics Letters. 2, 437 (2005).
- 14. W. Koechner, *Solid-state laser engineering*, (Springer, 2013).
- H. Kortz, H. Weber, Diffraction Losses and Mode Structure of Equivalent TEM₀₀ Optical Resonators, Applied optics. 20, 1936 (1981).
- 16. R. Iffländer, H. Kortz, H. Weber, *Beam divergence and refractive power of directly coated solid state lasers*, Optics Communications. **29**, 223 (1979).
- 17. L.A. Pipes, L.R. Harvill, *Applied Mathematics* for Engineers and Physicists, (1970).
- J.M. Eggleston, Periodic Resonators for Average-Power Scaling of Stable-Resonator Solid-State Lasers, IEEE journal of quantum electronics. 24, 1821 (1988).
- M.R. Moghaddam, M.M. Esfahani, H. Razzaghi, in: Proceeding of 8th Photonics Conference of Iran, (Malek-Ashtar University of Technology, Isfahan, February 6-7, 2002) 136-139 (In Persian).
- M.R. Moghaddam, et al., In: 30th Proceeding of the Annual Physics Conference of Iran, (Iran, August 2006) (In Persian).
- 21. V. Magni, *Multi-element Stable Resonators* Containing a Variable Lens, JOSA A. 4, 1962 (1987).
- 22. L. Qitao, S. Dong, H. Weber, *Analysis of TEM*₀₀ laser beam quality degradation caused by a birefringent Nd: YAG rod, Optical and quantum electronics. **27**, 777 (1995).
- S. De Silvestri, P. Laporta, V. Magni, Misalignment Sensitivity of Solid-State Laser Resonators with Thermal Lensing, Optics Communications. 59, 43 (1986).
- 24. H. Razzaghi, et al. In: *Proceeding of the Annual Physics Conference of Iran*, (Tehran, August 23-26, 2004) 27-29 (In Persian).

۴. نتیجهگیری

با بهره گیری از مدل توان انکساری توزیعیافته برای میلههای لیزری و اصول طراحی تشدیدگرهای پایدار دینامیکی، یک چینش تشدیدگری مبناء پیشنهاد شد که این چینش از میان تمامی آرایشهای ممکن برای دستیابی به یک حجم مد معین، کمترین حساسیت به تنظیمات اپتیکی را در عملکرد تک مد عرضی از خود به نمایش گذاشت. محاسبات اندازه لکه در کل تشدیدگر نشان داد که افزایش حجم مد اصلی داخل محيط بهره و كيفيت باريكه خروجي بدون نياز به محاسبات مجدد، به طور نظاممندی از روی طرح مبنا اولیه قابل انجام است. کاهش قدرت فوکوس آینهها و افزایش طول در این بازطراحي و توان افزايي مي تواند عموماً به افزايش حساسيت به تنظیمات ایتیکی در توانهای بالا منجر شود؛ ولی ثابت شد برای طرح مبنا پیشنهادی، که در آن مقادیر بزرگی از d₁ به کار گرفته شده است، این تغییرات در حساسیت به تنظیم، کمترین رشد خود را دارد. نشان داده شد که تغییر محیط بهره و لایههای نازک برای به کارگیری طرح موردنظر در طول موجهای بلندتر، امکان افزایش حجم مد اصلی و کاهش حساسیت به تنظیمات ایتیکی را می تواند مجدداً فراهم سازد. از آنجا که کاهش توان انکساری میله در توانهای بالا یکی از اصلی ترین موانع مقیاس دھی به نظر می سید، در این یژوهش تقسیم بار حرارتی میله حین فرآیند توانافزایی با به کارگیری تشدیدگرهای چند میلهای نیز مورد بررسی قرار گرفت. در انتها قابلیت یک تشدیدگر (دو میلهای) تناوبی براساس طرح مبناء ییشنهادی، برای افزایش حجم مد در هر دو میله، حفظ کیفیت باریکه حین توانافزایی و داشتن یک حساسیت به تنظیم مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج امکان حصول همزمان همه موارد فوق در توانهای بالا را مورد تأیید قرار میدهد.

مراجع

- 1. K. Driedger, R. Ifflander, H. Weber, *Multirod Resonators for High-Power Solid-State Lasers with Improved Beam Quality*, IEEE journal of quantum electronics. 24, 665 (1988).
- 2. H. Razzaghi, et al, *Highly Efficient Diode-End-Pumped Nd:YAG Composite Rod Laser*, Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications. **7**, 321 (2013).
- 3. B. Upadhyaya, et al., *Beam Quality Considerations of High Power Nd:YAG Lasers*, Optics & Laser Technology. **34**, 193 (2002).
- S. Tidwell, J. Seamans, M. Bowers, *Highly Efficient 60-W TEM*₀₀ CW Diode-End-Pumped Nd:YAG Laser, Optics letters. 18, 116 (1993).