



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

داود رزاقی، محمدرضا مقدم*، مرتضی ساسانی قمری

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان اnergi اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: mabdolhoseini@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۸/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۱۵

چکیده

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 توزیع یافته 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 مدل اصلی بالاتری (حداکثر دوازده برابر) برخوردار بوده و در عین حال حساسیت به تنظیم یکسانی دارد. در ادامه به دلیل محدودیت توان دمشی حین توان افزایی، از تشدیدگرهای چند میله‌ای تناوبی مبتنی بر یک طرح مبنا استفاده شده است. کارآیی تشدیدگرهای تناوبی در توان افزایی تک مد، به واسطه افزایش حجم مدل 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.

کلیدواژه‌ها: تک‌مدسازی عرضی، توان افزایی، تشدیدگرهای لیزری پایدار دینامیکی

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

Research Article

Received 19.11.2018, Accepted 6.7.2019

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



۱. مقدمه

توزيع یافته برای میله، یک چینش نامتقارن کوثر-کوژ، که با استفاده از آن حجم مدل اصلی تا ۱۲ برابر نسبت به تشیدگر 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 [۱-۷].

۲. مبانی نظری

به طور کلی اثرات بار حرارتی باعث ایجاد یک پروفایل عرضی برای ضربی 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 A می‌تواند به صورت یک عدسی معادل شود. در واقع اگر فواصل از صفحات اصلی پشت صفحات ورودی و خروجی سنجیده شوند، فاصله کانونی $F = -\frac{1}{C}$ خواهد بود که خارج صفحات اصلی خود ($h = \frac{1-D}{C}$) 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 چشمde دمsh P_E مرتبط است:

$$C = -n_{\circ} \Gamma \sin \Gamma \ell - 2D_E \cos \Gamma \ell + D_E \frac{\sin \Gamma \ell}{n_{\circ} \Gamma} \quad (1)$$

که در آن

$$-D_E = \frac{(1-n_{\circ}) \alpha R P_E \eta_H}{2 K A \ell} \quad (2)$$

و

$$\Gamma = \frac{1}{b} = \left(\frac{1}{n_{\circ} \ell A} \right)^{\frac{1}{\gamma}} (P_E)^{\frac{1}{\gamma}} \left[\frac{\eta_H}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_{\circ} \right) \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

است. اثر انحنای سطوح انتهایی و عدسی آن، از طریق توان انکسار D_E و اثرات ناشی از حرارت یا تنفس، از طریق Γ به توان دمsh وابسته می‌شوند. در این روابط n ضربی شکست میله، و

بالا بردن توان لیزرهای با تأثیر ناچیز بر کیفیت باریکه خروجی و نیز حفظ میزان حساسیت تشیدگر به اختلالاتی چون ناترازمندی، همواره در کانون توجه پژوهش‌گران این حوزه بوده است [۱-۵]. اصولاً توان افزایی به چند روش ممکن است: ۱) پوشش باریکه‌های با واگرایی یکسان کثار هم، ۲) جفت‌شدگی باریکه از طریق قطبش یا ترکیب طیفی خروجی لیزرهای یا از طریق ترکیب باریکه‌های همدوس، ۳) بزرگ کردن سطح مقطع محیط بهره، ۴) افزایش تعداد یا طول محیط بهره در یک تشیدگر (به دلیل محدودیت اعمال توان دمsh یکباره) و ۵) طرح‌های نوسانگر- تقویت‌کننده. روش اول به کاهش کیفیت باریکه منجر می‌شود. در روش سوم با هندسه قطعات اپتیکی افزوده می‌شود. در روش سوم با هندسه دیسکی، تا جایی که تنش مکانیکی و گسیل خودبه‌خودی- تقویت‌شده عرضی، توان خروجی از یک تک دیسک را محدود نکند، توان‌های دمsh، توان انکساری عدسی گرمایی و خروجی (متنااسب با سطح مد) قابل افزایش است. در روش سوم برای هندسه میله‌ای و تشیدگر پایدار، اگرچه تشکیل سطح دمsh بزرگ، به کاهش توان انکساری عدسی گرمایی و شاید حجم مدد اصلی بزرگ، منجر شود ولی در توان‌های بالا، هرگونه نوسان در عدسی گرمایی، می‌تواند به نوسانات گسترده در خواص مددی، 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 تشیدگرهای ناپایدار حالت جامد، کیفیت باریکه خروجی کاهش یافته [۶] ولی در تشیدگرهای پایدار- تناوبی، کیفیت باریکه بهبود خواهد یافت. در روش پنجم در رژیم کاری پیوسته، بهره Nd:YAG تقویت‌گری مؤثری را در خارج تشیدگر نتیجه نمی‌دهد. بدین ترتیب بهبود کیفیت باریکه و افزایش توان به جز از طریق تشیدگر حاصل نمی‌شود.

بدین ترتیب توجه خود را معطوف به افزایش نظام‌مند حجم مد و کیفیت باریکه در یک تشیدگر پایدار مینا خواهیم کرد که با تناوبی‌سازی آن، توان به صورت 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



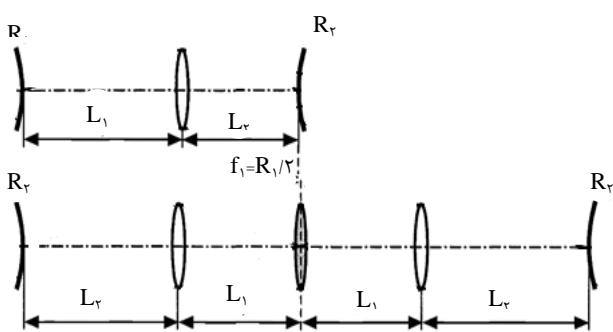
ماتریس عبور، از عناصر ماتریس انتقال تشیدگر تکمیله‌ای مبنی، با به کار بردن تئوری سیلوستر قابل محاسبه می‌باشد [۱۷]. به عبارت دیگر، ماتریس منتج M^n از ماتریس مبنی $M = \begin{bmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{bmatrix}$ به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$M_{\text{one trip}}^n = \begin{bmatrix} \cos n\theta & \frac{b' \sin n\theta}{\sin \theta} \\ \frac{c' \sin n\theta}{\sin \theta} & \cos n\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\cos \theta = \frac{a' + d'}{2} = \frac{g_1^* + g_2^*}{2}$$

در این رابطه $\cos \theta$ به صورت $\cos \theta \leq \cos n\theta \leq 1^\circ$ می‌باشد و به تعریف می‌شود که محدود به ۱ درجه است. برای ساخت یک تشیدگر تناوبی از تشیدگر مبنی (به استثناء چینش مبناء تخت-تخت) معمولاً به عدسی‌های داخلی اضافی، نیاز است (شکل ۱). در عمل، تعداد هدها (یا چمپرهای دمشی) قابل استفاده توسط فاکتورهای کاری محدود می‌شوند.

۳.۲ پایداری سازی دینامیکی برای کارکرد تک مد عرضی
در هر توان انکسار دلخواه از میله، به غیر از توانهای انکساری بحرانی، می‌توان اندازه لکه در کل تشیدگر 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، تشیدگر را در مرز ناحیه ناپایداری قرار می‌دهد. با تقریب عدسی ضخیم حرارتی، برای $n=1$ حداقل 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 نویسندها [۱۹، ۲۰]، به گستره توانی پایداری تشیدگرهای تک میله‌ای و چند میله‌ای پرداخته شده است.



شکل ۱. ساخت یک تشیدگر تناوبی از تشیدگر مبنی.

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

$$(4) \quad D(m^{-1}) = f^{-1} = \frac{dn}{dT} \times \frac{P_{\text{heat}}}{\gamma K A} \propto P_{\text{in}}(kW)$$

در این رابطه P_{heat} توان هدر رفته و A سطح مقطع ناحیه دمش است [۱۲]. این تابعیت توانی، به چشم‌هه دمش، هندسه و توزیع شدت دمش بستگی دارد [۱۴، ۱۲]. رابطه‌ی (۴) نشان می‌دهد که هم شاخص شایستگی عددی محیط بهره برای توانهای بالا (یعنی $\frac{dn}{dT} \times \frac{1}{k}$) و روند تولید توان گرمایی (۴) باید کوچک نگاه داشته شود.

۱.۲ معادل‌سازی تشیدگرهای

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

$$(5) \quad M = \begin{pmatrix} g_1^* & L^* \\ \frac{g_1^* g_2^* - 1}{L^*} & g_2^* \end{pmatrix}$$

تساوی مقادیر متناظر از این پارامترها در دو تشیدگر، به معنی ۱) وضعیت یکسان شرایط پایداری $g_1^*, g_2^* \leq 1$ ، ۲) مقادیر یکسان اندازه لکه‌های مد اصلی روی آینه‌های متناظر [۱۶]، ۳) روابط یکسان، بر حسب 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 مشکلات تشیدگرهای تناوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲.۰ تشیدگرهای تناوبی

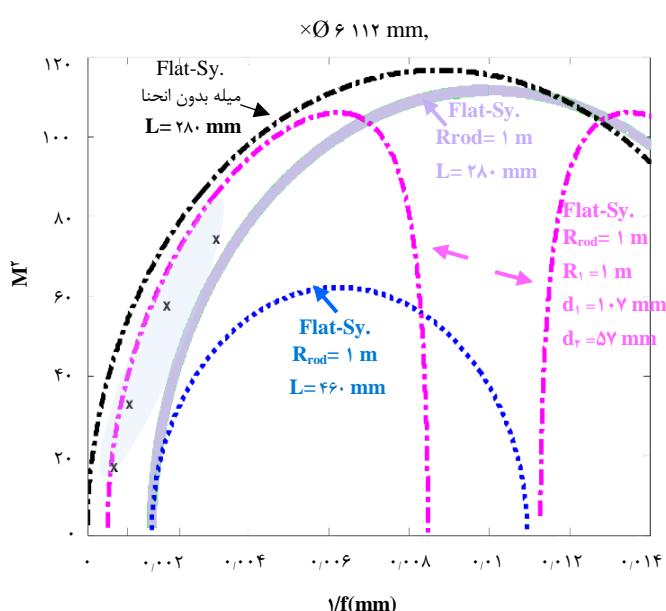
تناوبی بودن شامل تساوی توانهای انکساری ($D_i = 1/f_i$) در تمام میله‌ها است. از لحاظ ریاضی، g_i^* به همراه دیگر عناصر



۳. یافته‌ها و بحث

برای هر دو تقریب عدسی نازک و ضخیم و برای $n=1$ ، تحول توانی در یک چینش خطی دلخواه، به یک تغییر موقعیت در فضای پایداری g_i^* با یک مسیر خطی منجر خواهد شد. با یک مدل DPR تحول توانی در همان تشیدیدگرها 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 تشیدیدگر و افزایش طول تشیدیدگر را نشان می‌دهد. برای یک تشیدیدگر غیرمتقارن، رفتار نقاط تجربی با رفتار پیش‌بینی شده از تئوری تطابق خوبی دارد. این داده‌ها حاصل ساخت یک لیزر $W = 300$ با چنین آرایشی است [۲۴].

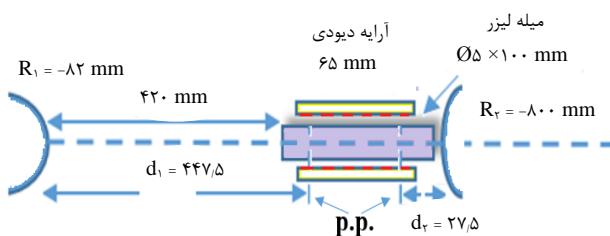
در $\frac{1}{f}(mm) < 0.003$ یا ناحیه عدسی گرمایی ضعیف، به دلیل جبران کافی عدسی گرمایی توسط انحنادهی به میله، تشیدیدگرهای غیر هم‌طول تخت-متقارن با میله‌های انحنادار، دارای کیفیت باریکه نزدیک به هم هستند. این رفتار توسط اندازه‌گیری‌های تجربی تأیید شده است [۲۵].



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

برای پایداری‌سازی دینامیکی تشیدیدگرها 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 $S_i = \rho_i (\alpha_i)^{-1}$ برای آینه λ ام تعریف کرد که در آن ρ_i جایه جایی محور مد بر روی میله، به سبب چرخش زاویه‌ای α_i باشد. چون در شرایط پایداری دینامیکی، S_i اندازه لکه پایدار شده در میله کند تغییر است، از S_i اندازه لکه روی میله تأثیر قابل توجهی نمی‌پذیرد. بدیهی است که حساسیت کلی به صورت $S = \sqrt{(S_1^2 + S_2^2)}$ تعریف می‌شود [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 می‌شود. مناسب‌تر است که از قرارگیری در ناحیه II به خاطر افزایش فزاينده S با تغییر f ، پرهیز شود. یعنی جای‌دهی 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 (R_i , d_i), در یک توان کاری مشخص $D_{tot} = I/f$ ، چهار شرط زیر می‌توانند در رسیدن به یک جواب معقول کمک کننده باشند: توان ورودی (یا توان انکساری معین)، شعاع میله $1/2$ تا $1/2$ برابر اندازه لکه بر روی میله، طول مشخص تشیدیدگر مبنای $L = d_1 + d_2$ ، و در نهایت داشتن کمینه I در توان انکساری مورد نظر با قرارگیری در ناحیه پایداری شرط دوم برای نسبت شعاع میله به اندازه لکه مد اصلی روی آن، تضمین کننده اتلاف پراشی بالاتر از بهره برای مدهای غیر TEM₀₀ و حذف آن‌ها حین شکل‌گیری باریکه است که کدنویسی در نرم‌افزار Glad این موضوع را تأیید خواهد کرد.





شکل ۳. تشدیدگر پیشنهادی مبنا با یک میله.

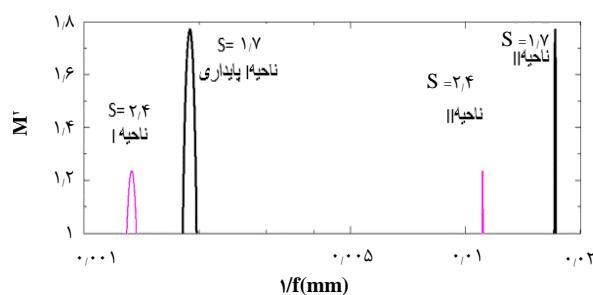
به عبارتی همگی آن‌ها دارای یک کیفیت باریکه M^2 می‌باشند. از آن‌جا که رسم منحنی‌های حساسیت به تنظیم (S و یا $S_{1/2}$), برحسب مکان میله نشان داد که حساسیت به تنظیم، با افزایش d_1 کاهش می‌یابد، براین اساس مکان میله در طرح مبنا به صورت $mm = 420$ انتخاب شد. مقادیر شعاع آینه‌ها برای اساس $R_1 = -82\text{ mm}$ و $R_2 = -80\text{ mm}$ 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 می‌شود و مشخصه‌های لیزری برای چند مقدار مختلف از K ، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این بدین معنی است که محیط بهره باید به گونه‌ای برای توان افزایی در نظر گرفته شود که، توان انكساری اپتیکی آن متناسب با K^{-1} 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 انكساری تا ۵۰٪ قابل کاهش است. نتایج اثربخشی این کار قبلًا به صورت تجربی 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، مقیاس‌پذیری با این قاعده به خوبی انجام‌پذیر است؛ زیرا بزرگ‌ترین اندازه لکه درون میله شکل می‌گیرد و مقدار آن در میله تقریباً با جذر K به صورت $K^{0.65} = 1.36$ قابل رشد است. با دقت بیشتر در تعیین فواصل صفحات اصلی، توان در این رابطه به 0.5 نزدیک‌تر می‌شود؛ یعنی سطح مقطع مد اصلی متناسب با K افزایش می‌یابد و داشتن مقطع بزرگ‌تری از باریکه به معنی ثابت ماندن شدت حین ارتقا سیستم آن است. بدین ترتیب افزایش توان خروجی با فاکتور K^2 یا محدود قطر محیط بهره امکان‌پذیر است. اگر توان‌های انكساری برای

باید توجه داشت که غیرتحت کردن متقارن سطوح انتهایی میله‌ی لیزری، کیفیت باریکه را فقط در توان‌های پایین بهبود می‌بخشد. 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 باریکی از خط مفید است، ولی این 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 مده، 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 می‌کند. بدین ترتیب فشرده‌گی آرایش الزاماً به معنی 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 تصمیم گرفت. به عنوان مثال یا به دنبال تک مدرسازی عرضی و توان افزایی بود و یا تک خط‌سازی.

در ادامه یک تشدیدگر پایدار دینامیکی $\lambda = 1064\text{ nm}$ با توان انكساری $(30\text{ cm})^2 / 1\text{ W}$ و یک توان دمش $W = 800\text{ J}$ ، بر طبق بخش ۲، طراحی و مبنای قرار می‌گیرد که در آن میله لیزری به قطر 5 mm و طول 100 mm در یک طول دمش مؤثر 65 mm به بهره می‌رسد (شکل ۳). کارکرد تک مد عرضی با طول فیزیکی 520 mm از تشدیدگر مبنا، با آرایش‌های مختلف (d_i, R_i) امکان‌پذیر است. در همه آرایش‌های ممکن، توان‌های اپتیکی کرانی ناحیه II تغییر می‌کند. در حالی که توان‌های بحرانی ناحیه I ثابت هستند، مقدار توان انكساری 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 $16/1$ برای قطر لکه در میله به قطر میله است (اندازه لکه یکسان روی میله صرف نظر از ترکیب انتخاب شده). تفاوت همگی این آرایش‌ها در حساسیت به تنظیم، اندازه لکه تا اینه‌ها و واگرایی خروجی است.





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

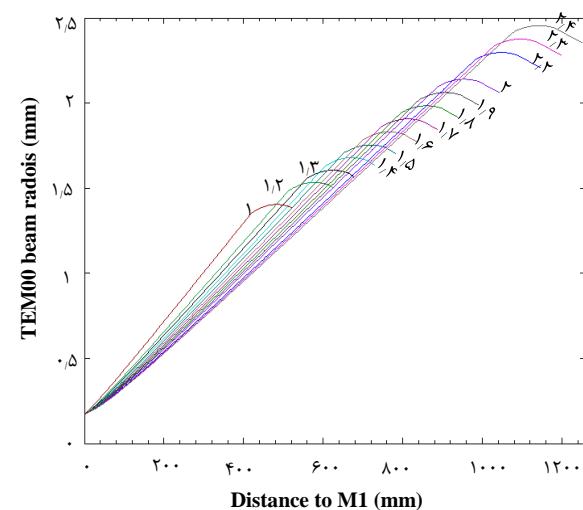
با توجه به شکل ۷، به استثناء انتخاب‌های بزرگ از d_1 ، حساسیت به تنظیمات اپتیکی در شرایط پایداری دینامیکی، حین مقایسه افزایش می‌یابد که برای مقادیر بزرگ‌تری از d_1 محسوس نیست.

در شکل‌های ۸ و ۹ حین توان افزایی 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 $\sqrt{2}$ برابر و سطح مقطع 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 مدل 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 به جای افزایش آن هستیم. بدین ترتیب قادر خواهیم بود که تحمل‌پذیری چینش نسبت به خطاهای زاویه‌ای با فاکتور K افزایش دهیم. برای طول موج $2 \mu\text{m}$ می‌توان از محیط لیزری CTH:YAG یا Tm:YAG استفاده کرد.

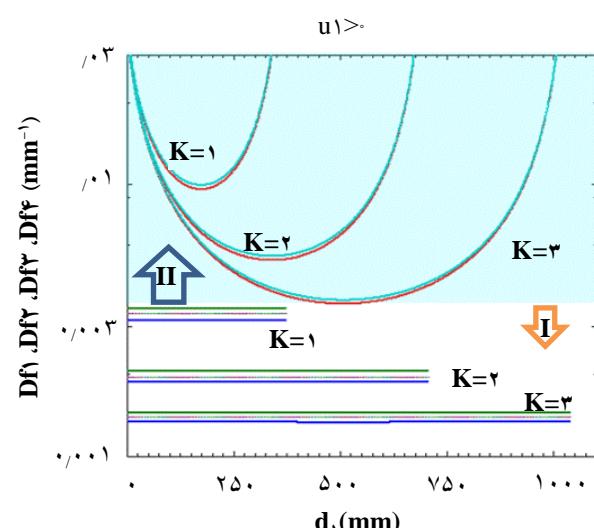
قاعده ارتقا با تغییر λ ، بدون تغییر d_i ، R_i و توان انکساری میله، برای هر آرایش تشیدیگری دلخواه (پایدارشده یا نشده دینامیکی) صادق است (شکل ۱۱).

برای مشخصه‌های تشیدیگری مثال زده شده، پر شدن قطر میله در بالاترین مدد، در هر دو طول موج به یک شکل انجام می‌شود (شکل ۱۲).

مقیاس‌دهی، به صورتی که توضیح داده شد قابل تنظیم باشند، نواحی پایداری تشیدیگر بحسب توان شکست گرمایی برای آرایش‌های ممکن مختلف از طراحی (d_i , R_i) 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 M^* در طرح پیشنهادی برای دو مقدار مختلف از K در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. شکل‌های ۴ و ۶ نشان می‌دهند که با افزایش K ، حجم مدل اصلی و کیفیت باریکه خروجی ارتقا می‌یابد.

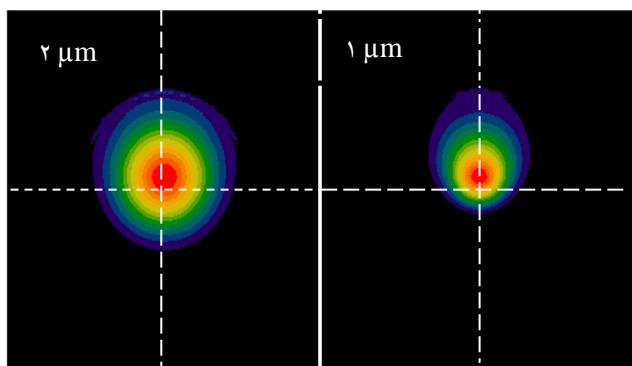


شکل ۴. اندازه لکه در تشیدیگر و رشد آن در میله با فاکتور K .

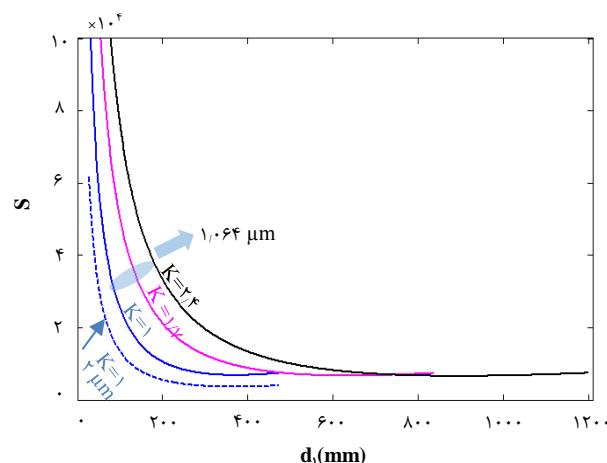


شکل ۵. توان‌های شکست بحرانی برای مکان‌های مختلف از میله به ازاء مقادیر مختلف K .

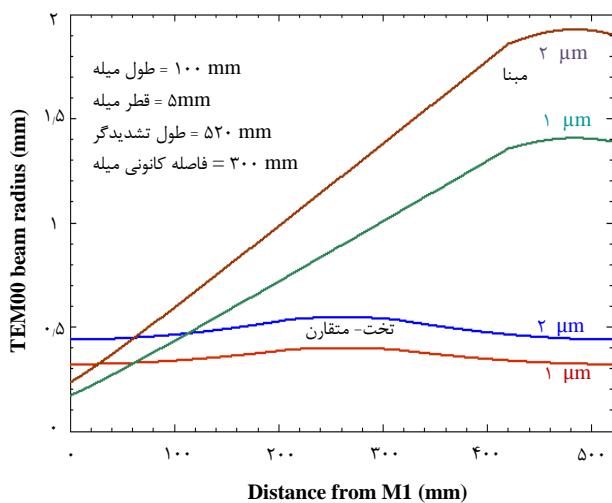




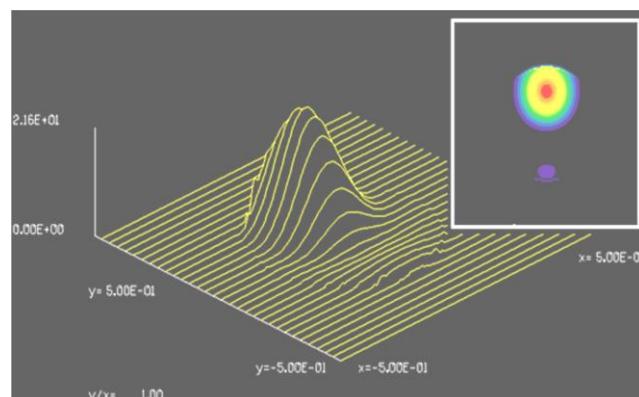
شکل ۱۰. انحراف زاویه‌ای یکسان برای آینه R_2 در طول موج اصلی و $\frac{1}{3}\lambda$ در طول موج $2 \mu\text{m}$ برای طرح مبنا (۱). $k = 1$.



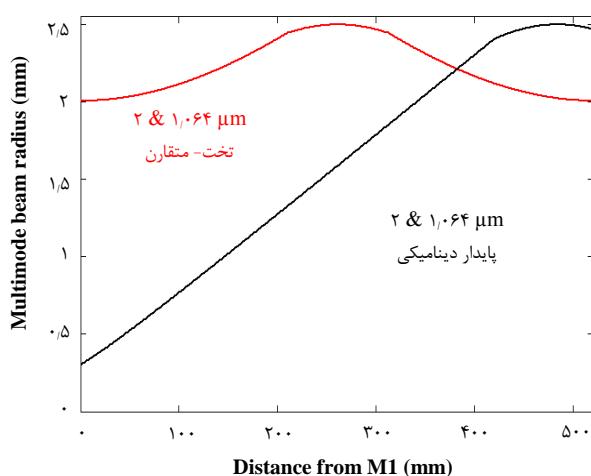
شکل ۷. منحنی حساسیت به تنظیم در تشیدگرهای پایدار دینامیکی و تغییرات آن هنگام توان افزایی.



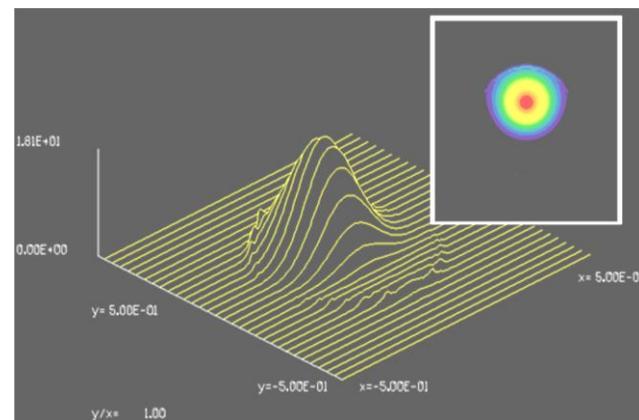
شکل ۱۱. مقایسه افزایش اندازه لکه مد اصلی در طرح مبنا و تخت-متقارن با افزایش λ بدون تغییر توان انکساری میله.



شکل ۸. حساسیت به ترازمندی در طرح مبنا ۱ برای انحراف $\lambda/7$ در R_2 .

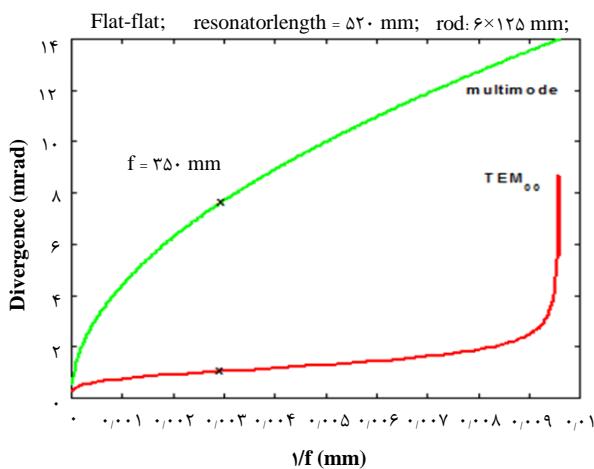


شکل ۱۲. مقایسه اندازه لکه بزرگترین و بالاترین مد ممکن در تشیدگرهای تخت-متقارن و مبنا برای دو طول موج مختلف λ .

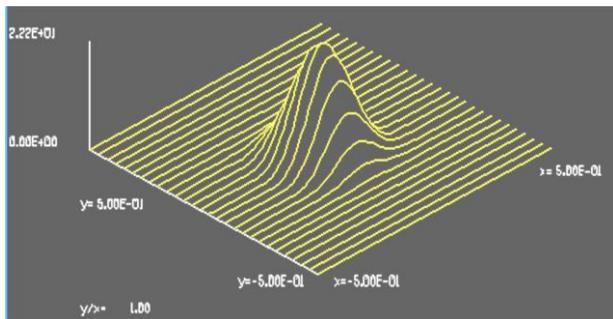


شکل ۹. حساسیت به ترازمندی با توان افزایی برای $\lambda/7$ در R_2 .

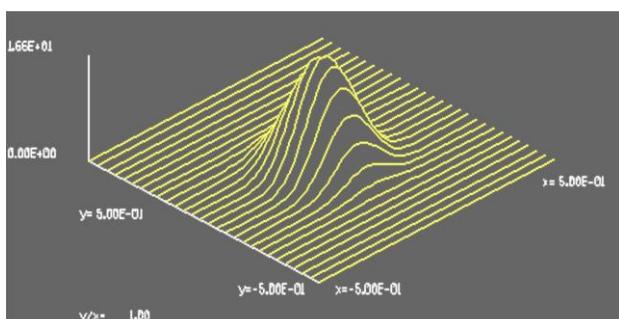




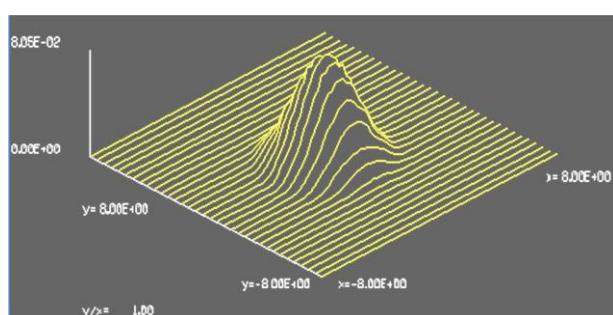
شکل ۱۴. مقایسه واگرایی برای مد اصلی و بالاترین مد در یک تشدیدگر (پایدار)، دو میله‌ای تخت- متقارن، تناوبی با طول موج $\lambda = 1064 \text{ nm}$.



شکل ۱۵. 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.

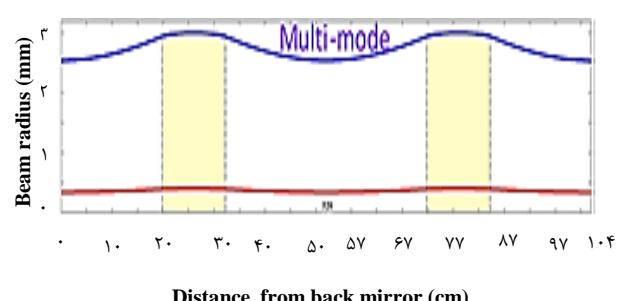


شکل ۱۷. نمایه گوسی و اندازه لکه در فاصله ۱۰ متری از تشدیدگر دو میله‌ای پریودیک پیشنهادی.

در تشدیدگر پایدار دینامیکی، بالاترین مد همان مد اصلی است؛ در صورتی که 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 باریکه را در توانهای بالاتر ثابت نگاه داشت. شکل ۱۳ نشان می‌دهد برای تشدیدگر ساده تخت- متقارن ($f_i = 350 \text{ mm}$) طول 520 mm ، اگرچه تناوبی‌سازی پرشدگی مد اصلی را در هر دو میله به قطر 6 mm یکسان نگاه می‌دارد، ولی اندازه لکه مد اصلی را در میله‌ها به شعاع میله نزدیک نمی‌کند.

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 $f_i = 350 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ توزیع میدان روی آینه خروجی و در فاصله ۱۰ متر از آن را برای یک تشدیدگر مبناه 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 تشدیدگر تخت- متقارن پایدار- تناوبی دو میله‌ای $f = 350 \text{ mm}$ $\lambda = 1064 \text{ nm}$



5. D. Naidoo, I.A. Litvin, A. Forbes, *Brightness Enhancement in a Solid-State Laser by Mode Transformation*, *Optica*, **5**, 836 (2018).
6. N. Hodgson, G. Bostanjoglo, H. Weber, *Multirod Unstable Resonators for High-Power Solid-State Lasers*, *Applied optics*, **32**, 5902 (1993).
7. F. Hajiesmaeilbaigi, et al. *Design and Construction of a 110 W Green Laser for Medical Application*, *Optics & Laser Technology*, **43**, 1428 (2011).
8. F. Hajiesmaeilbaigi, et al. *High-Average-Power Diode-Side-Pumped Double Q-Switched Nd: YAG Laser*, *Laser Physics Letters*, **4**, 261 (2006).
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).
12. W. Koechner, Michael Bass, *Solid-State Lasers: A Graduate Text* (Springer Science & Business Media, 2006)
13. 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).
15. 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).
18. J.M. Eggleston, *Periodic Resonators for Average-Power Scaling of Stable-Resonator Solid-State Lasers*, *IEEE journal of quantum electronics*, **24**, 1821 (1988).
19. 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).
20. 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 TEM₀₀ laser beam quality degradation caused by a birefringent Nd: YAG rod*, *Optical and quantum electronics*, **27**, 777 (1995).
23. 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

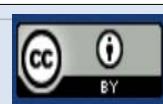
با بهره‌گیری از مدل توان انکساری توزیع یافته برای میله‌های لیزری و اصول طراحی تشدیدگرهای پایدار دینامیکی، یک چینش تشدیدگری میناء پیشنهاد شد که این چینش از میان تمامی آرایش‌های ممکن برای دست‌یابی به یک حجم مدعی، کمترین حساسیت به تنظیمات اپتیکی را در عملکرد تک مد عرضی از خود به نمایش گذاشت. محاسبات اندازه لکه در کل تشدیدگر نشان داد که افزایش حجم مد اصلی داخل محیط بهره و کیفیت باریکه خروجی بدون نیاز به محاسبات مجدد، به طور نظاممندی از روی طرح مبنا اولیه قابل انجام است. کاهش قدرت فوکوس آینه‌ها و افزایش طول در این بازطراحی و توان افزایی می‌تواند عموماً به افزایش حساسیت به تنظیمات اپتیکی در توان‌های بالا منجر شود؛ ولی ثابت شد برای طرح مبنا پیشنهادی، که در آن مقادیر بزرگی از d_1 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 اپتیکی را می‌تواند مجدداً فراهم سازد. آن‌جا که کاهش توان انکساری میله در توان‌های بالا یکی از اصلی‌ترین موانع مقیاس‌دهی به نظر می‌رسید، در این پژوهش تقسیم بار حرارتی میله حین فرآیند توان افزایی با به کارگیری تشدیدگرهای چند میله‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت. در انتهای قابلیت یک تشدیدگر (دو میله‌ای) تناوبی براساس طرح مبنا پیشنهادی، برای افزایش حجم مد در هر دو میله، حفظ کیفیت باریکه حین توان افزایی و داشتن یک حساسیت به تنظیم مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج امکان حصول همزمان همه موارد فوق در توان‌های بالا 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).
4. S. Tidwell, J. Seamans, M. Bowers, *Highly Efficient 60-W TEM₀₀ CW Diode-End-Pumped Nd:YAG Laser*, *Optics letters*, **18**, 116 (1993).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

داد و رزاقی، محمد رضا مقدم، مرتضی ساسانی قمصی (۱۳۹۹)، توان افزایی نظام مند با تشدیدگرهای Nd:YAG پایدار دینامیکی در کارکرد لیزری تک مد عرضی، *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 91, No 1, 2020, P 136-144

DOI: 10.24200/nst.2020.1103

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1103.html

مجله علوم و فنون هسته‌ای

جلد ۹۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، ص ۱۳۶-۱۴۴

