

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 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 توزیع‌یافته و نرم‌افزار GLAD، یک تشدیدگر مینای 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 مینا 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.

کلیدواژه‌ها: تک‌مده‌سازی عرضی، توان‌افزایی، 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

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

توزیع یافته برای میله، یک چینش نامتقارن کوژ-کوژ، که با استفاده از آن حجم مد اصلی تا ۱۲ برابر نسبت به تشدیدگر تخت-مقارن افزایش یافته است، مبنای کار قرار خواهد گرفت. برای این طرح مینا پایداری دینامیکی، حساسیت به تنظیم، تناوبی سازی چینش، پروفایل خروجی و صحت محاسبات عددی برای این طرح مینا از طریق نرم افزار GLAD مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. با رسم منحنی های مختلف، قواعد حاکم بر ارتقاء توانی و کیفیتی به نمایش گذاشته می شود. نقاط کاری مدنظر، همگی براساس مشخصات واقعی کاواک های دمیده از پهلو و میله های 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، می شود. به طور کلی هر سیستم اپتیکی با ماتریس انتقال ABCD می تواند 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 می کند [۱۱]. برای میله لیزری با دمش جانبی، عنصر C در این ماتریس به صورت زیر به توان الکتریکی چشمه دمش P_E مرتبط است:

$$C = -n_0 \Gamma \sin \Gamma \ell - 2D_E \cos \Gamma \ell + D_E \frac{\sin \Gamma \ell}{n_0 \Gamma} \quad (1)$$

که در آن

$$-D_E = \frac{(1-n_0) \alpha R P_E \eta_H}{2KA \ell} \quad (2)$$

و

$$\Gamma = \frac{2}{b} = \left(\frac{1}{n_0 \ell A} \right)^{\frac{1}{2}} (P_E)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\eta_H}{K} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_r \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

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

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 توان افزایشی به چند روش ممکن است: (۱) پوشش باریکه های با واگرایی یکسان کنار هم، (۲) جفت شدگی باریکه از طریق قطبش یا ترکیب طیفی خروجی لیزرها و یا از طریق ترکیب باریکه های-همدوس، (۳) بزرگ کردن سطح مقطع محیط بهره، (۴) افزایش تعداد یا طول محیط بهره در یک تشدیدگر (به دلیل محدودیت اعمال توان دمش یک باره) و (۵) طرح های نوسانگر- تقویت کننده. روش اول به کاهش کیفیت باریکه منجر می شود. در روش دوم به تعداد قطعات اپتیکی افزوده می شود. در روش سوم با هندسه دیسکی، تا جایی که تنش مکانیکی و گسیل خودبه خودی- تقویت شده عرضی، توان خروجی از یک تک دیسک را محدود نکند، توان های دمش، توان انکساری عدسی گرمایی و خروجی (متناسب با سطح مد) قابل افزایش است. در روش سوم برای هندسه میله ای و تشدیدگر پایدار، اگرچه تشکیل سطح دمش بزرگ، به کاهش توان انکساری عدسی گرمایی و شاید حجم مد اصلی بزرگ، منجر شود ولی در توان های بالا، هرگونه نوسان در عدسی گرمایی، می تواند 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 می کنند. در روش چهارم در هندسه میله ای با افزایش تعداد میله ها 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 نمی دهد. بدین ترتیب بهبود کیفیت باریکه و افزایش توان به جز از طریق تشدیدگر حاصل نمی شود.

بدین ترتیب توجه خود را معطوف به افزایش نظام مند حجم مد و کیفیت باریکه در یک تشدیدگر پایدار مینا خواهیم کرد که با تناوبی سازی آن، توان به صورت نظام مندی افزایش یابد. این ارتقا پذیری قاعده مند باید بدون استفاده از طرح های پیچیده یا تأثیرگذاری منفی روی پارامترهای دیگر حاصل شود. در این پژوهش با نرم افزار MATLAB و مدل توان انکساری

مینا، با به کار بردن تئوری سیلویستر قابل محاسبه می‌باشند [۱۷]. به عبارت دیگر، ماتریس منتج M^n از ماتریس مینا

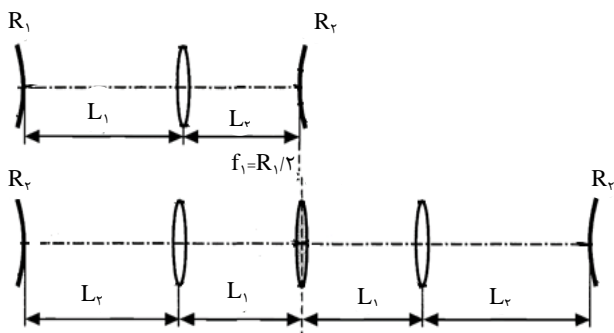
$$M = \begin{bmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{bmatrix} \quad \text{به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:}$$

$$M_{one\ trip}^n = \begin{bmatrix} \cos n\theta & \frac{b' \sin n\theta}{\sin \theta} \\ \frac{c' \sin n\theta}{\sin \theta} & \cos n\theta \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در این رابطه $\cos \theta$ به صورت $\cos \theta = \frac{a'+d'}{2} = \frac{g_1^* + g_2^*}{2}$ تعریف می‌شود که محدود به $0 \leq \cos n\theta \leq 1$ می‌باشد و به تعداد میله‌ها n وابسته است. برای ساخت یک تشدیدگر تناوبی از تشدیدگر مینا (به استثناء چینش میناء تخت-تخت) معمولاً به عدسی‌های داخلی اضافی، نیاز است (شکل ۱). در عمل، تعداد هدها (یا چمبرهای دمشی) قابل استفاده توسط فاکتورهای کاری محدود می‌شوند.

۳.۲ پایداری‌سازی دینامیکی برای کارکرد تک مد عرضی

در هر توان انکسار دل‌خواه 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 $n=1$ 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 است.



شکل ۱. ساخت یک تشدیدگر تناوبی از تشدیدگر مینا.

n_0 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:

$$D(m^{-1}) = f^{-1} = \frac{dn}{dT} \times \frac{P_{heat}}{2KA} \propto P_{in} (kW) \quad (۴)$$

در این رابطه P_{heat} توان هدر رفته و A سطح مقطع 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 توان‌های بالا (یعنی $\frac{dn}{dT} \times \frac{1}{k}$) و روند تولید توان گرمایی ($P_H = \eta_H \times P_E$) باید کوچک نگاه داشته شود.

۱.۲ معادل‌سازی تشدیدگرها

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

$$M = \begin{pmatrix} g_1^* & L^* \\ \frac{g_1^* g_2^* - 1}{L^*} & g_2^* \end{pmatrix} \quad (۵)$$

تساوی مقادیر متناظر از این پارامترها در دو تشدیدگر، به معنی (۱) وضعیت یکسان شرایط پایداری $0 \leq g_1^* g_2^* \leq 1$ ، (۲) مقادیر یکسان اندازه لکه‌های مد اصلی روی آینه‌های متناظر [۱۶]، (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 مشکلات تشدیدگرهای تناوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲.۲ تشدیدگرهای تناوبی

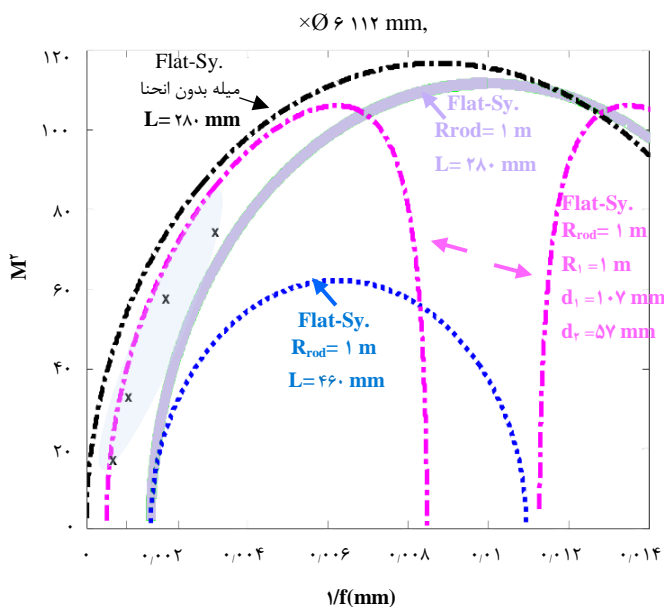
تناوبی بودن شامل تساوی توان‌های انکساری ($D_i = 1/f_i$) در تمام میله‌ها است. از لحاظ ریاضی، g_i^* به همراه دیگر عناصر ماتریس عبور، از عناصر ماتریس انتقال تشدیدگر تک‌میله‌ای

۳. یافته‌ها و بحث

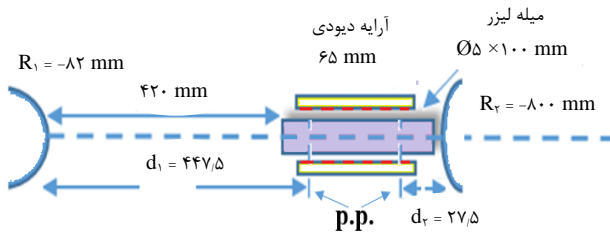
برای هر دو تقریب عدسی نازک و ضخیم و برای $n=1$ ، تحول توانی در یک چینش خطی دلخواه، به یک تغییر موقعیت در فضای پایداری g_i^* با یک مسیر خطی منجر خواهد شد. با یک مدل DPR تحول توانی در همان تشدیدگرها به صورت یک مسیر حلزونی با تعداد زیادی نقطه برگشت در خارج حوزه پایداری است. در عمل برای یک میله Nd:YAG نقاط 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 W ۳۰۰ با چنین آرایشی است [۲۴].

در $1/f(\text{mm}) < 0.003$ یا ناحیه عدسی گرمایی ضعیف، به دلیل جبران کافی عدسی گرمایی توسط انحنای میله، تشدیدگرهای غیر هم‌طول تخت-متقارن با میله‌های انحنادار، دارای کیفیت باریکه نزدیک به هم هستند. این رفتار توسط اندازه‌گیری‌های تجربی تأیید شده است [۲۴].

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 $(w_p \alpha_i)^{-1} = S_i = \rho_i$ برای آینه نام تعریف 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_p اندازه لکه پایدار شده در میله کند تغییر است، S_i از 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 فزاینده 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 $D_{\text{tot}}=I/f$ ، چهار شرط زیر می‌توانند در رسیدن به یک جواب معقول کمک‌کننده باشند: توان ورودی (یا توان انکساری معین)، شعاع میله $1/2$ تا 2 برابر اندازه لکه بر روی میله، طول مشخص تشدیدگر مینا $L = d_1 + d_2$ ، 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، تضمین‌کننده اتلاف پراشی بالاتر از بهره برای مدهای غیر TEM_{00} و حذف آن‌ها حین شکل‌گیری باریکه است که کدنویسی در نرم‌افزار Glad این موضوع را تأیید خواهد کرد.



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



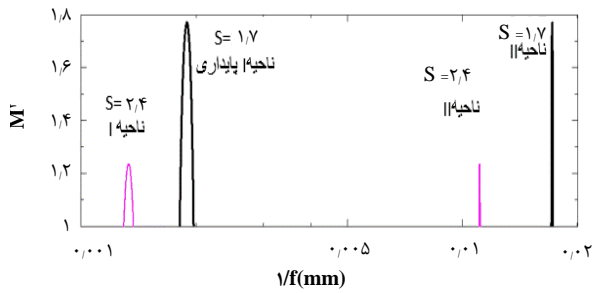
شکل ۳. تشدیدگر پیشنهادی مینا با یک میله.

به عبارتی همگی آن‌ها دارای یک کیفیت باریکه M^2 می‌باشند. از آن‌جا که رسم منحنی‌های حساسیت به تنظیم (S 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 مینا به صورت $d_1 = 420$ mm انتخاب شد. مقادیر شعاع آینه‌ها براین اساس $R_1 = -82$ mm و $R_2 = -800$ 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 توان‌افزایی در نظر گرفته شود که، توان انکساری 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 به‌کارگیری توزیع‌های شدت دمشی خاص در میله، توان انکساری تا ۵۰٪ قابل کاهش است. نتایج اثربخشی این کار قبلاً 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 $\omega = 1.36 \times K^{0.165}$ قابل رشد است. با دقت بیشتر در تعیین فواصل صفحات اصلی، توان در این رابطه به ۰/۵ 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 مجذور قطر محیط بهره امکان‌پذیر است. اگر توان‌های انکساری برای

باید توجه داشت که غیرتخت 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 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 می‌کند. بدین ترتیب فشردگی 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. به‌عنوان مثال یا به دنبال تک مدسازی عرضی و توان‌افزایی بود و یا تک خط‌سازی.

در ادامه یک تشدیدگر پایدار دینامیکی $\lambda = 1064$ nm با توان انکساری $(30\text{ cm})/1$ و یک توان دمش 800 W ، بر طبق بخش ۲، طراحی و مینا قرار می‌گیرد که در آن میله لیزری به قطر ۵ mm و طول ۱۰۰ mm در یک طول دمش مؤثر ۶۵ mm به بهره می‌رسد (شکل ۳). کارکرد تک مد عرضی با طول فیزیکی ۵۲۰ mm از تشدیدگر مینا، 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 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 آینه‌ها و واگرایی خروجی است.



شکل ۶: M^2 برای دو مقدار مختلف از K در دو گستره پایداری.

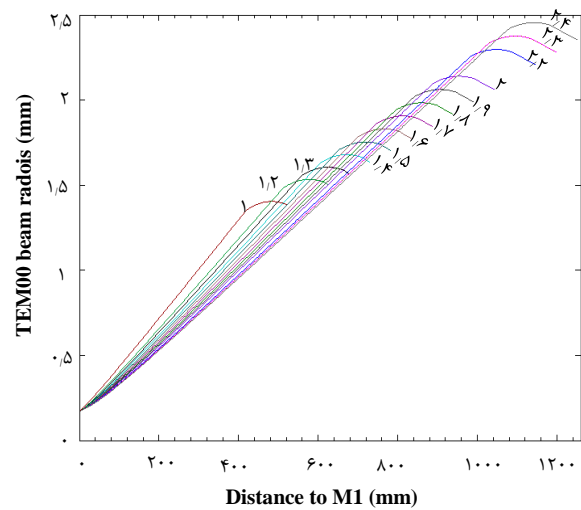
با توجه به شکل ۷، به استثناء انتخاب‌های بزرگ از d_1 ، حساسیت به تنظیمات اپتیکی در شرایط پایداری دینامیکی، حین مقیاس‌دهی افزایش می‌یابد که برای مقادیر بزرگ‌تری از d_1 محسوس نیست.

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 $\sqrt{2}$ 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 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 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.

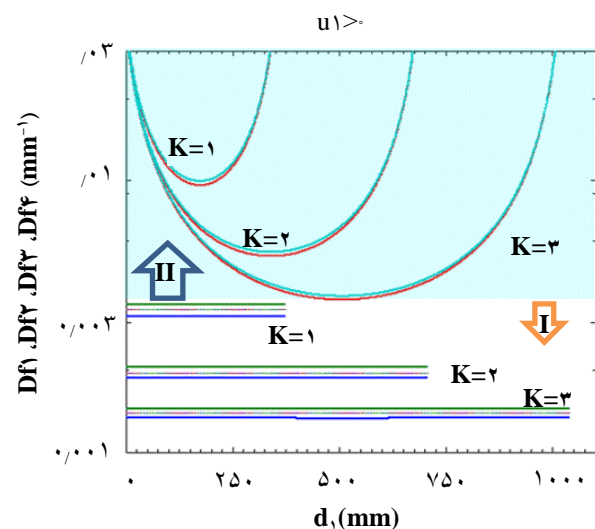
قاعده ارتقا با تغییر λ بدون تغییر d_i ، R_i و توان انکساری میله، برای هر آرایش تشدیدگری دل‌خواه (پایدار شده یا نشده دینامیکی) صادق است (شکل ۱۱).

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).

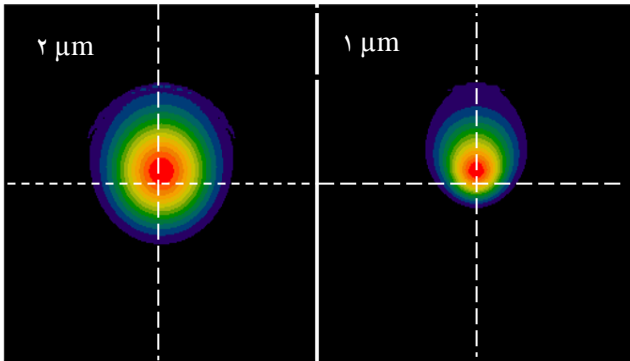
مقیاس‌دهی، به صورتی که توضیح داده شد قابل تنظیم باشند، نواحی پایداری تشدیدگر برحسب توان شکست گرمایی برای آرایش‌های ممکن مختلف از طراحی (d_i , R_i) و مقادیر متفاوت K ، در شکل ۵ رسم شده است. ناحیه محصور بین دو منحنی مجاور متعلق به ناحیه II، و ناحیه محصور بین دو خط مجاور متعلق به ناحیه I است. کیفیت باریکه یا M^2 در طرح پیشنهادی برای دو مقدار مختلف از K در شکل ۶ با یکدیگر مقایسه شده است. شکل‌های ۴ و ۶ نشان می‌دهد که با افزایش K ، حجم مد اصلی و کیفیت باریکه خروجی ارتقا می‌یابد.



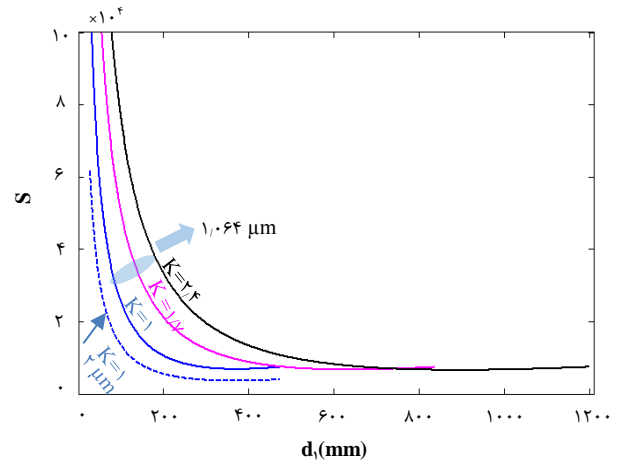
شکل ۴: اندازه لکه در تشدیدگر و رشد آن در میله با فاکتور K .



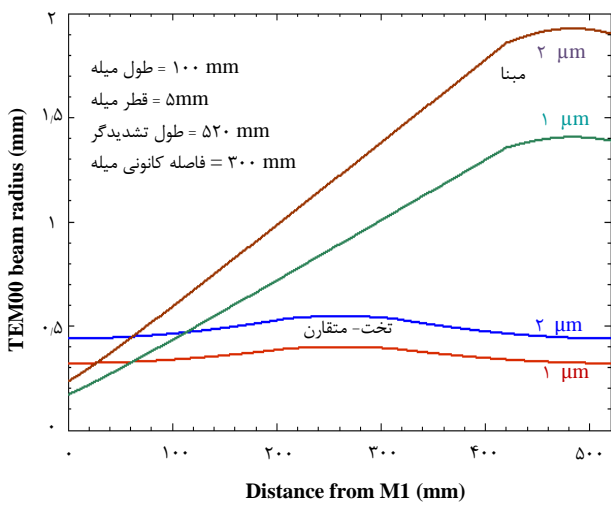
شکل ۵: توان‌های شکست بحرانی برای مکان‌های مختلف از میله به ازاء مقادیر مختلف K .



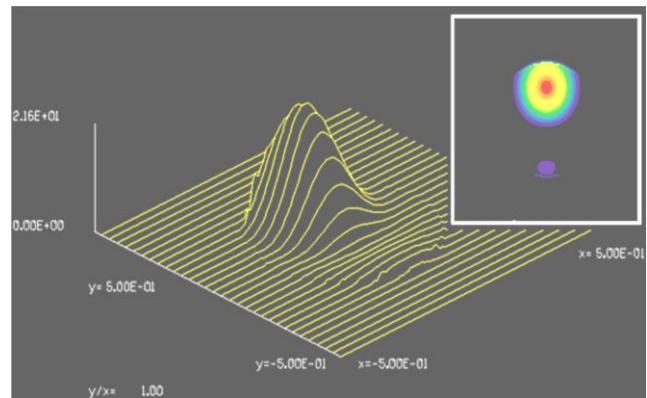
شکل ۱۰. انحراف زاویه‌ای یکسان برای آینه R_2 (در طول موج اصلی $\lambda = 0.6$ و $\lambda = 0.3$ در طول موج $2 \mu\text{m}$ برای طرح مینا ($k = 1$)).



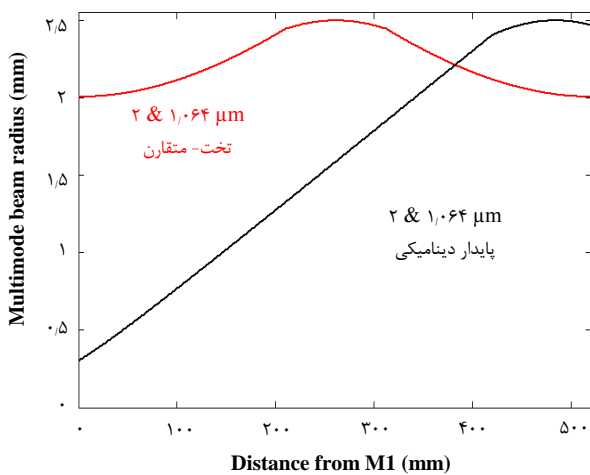
شکل ۷. منحنی حساسیت به تنظیم در تشدیدگرهای پایدار دینامیکی و تغییرات آن هنگام توان‌افزایی.



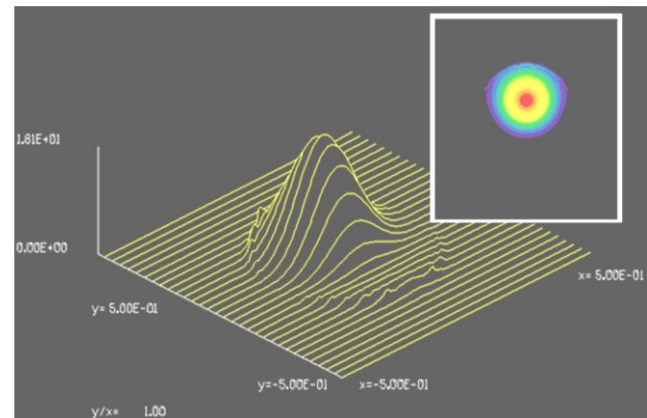
شکل ۱۱. مقایسه افزایش اندازه لکه مد اصلی در طرح مینا و تخت-متقارن با افزایش λ بدون تغییر توان انکساری میله.



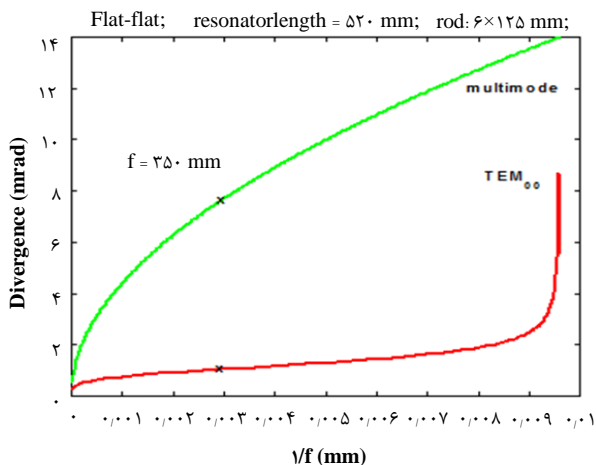
شکل ۸. حساسیت به ترازمندی در طرح مینا $k = 1$ برای انحراف 0.7λ در R_2 .



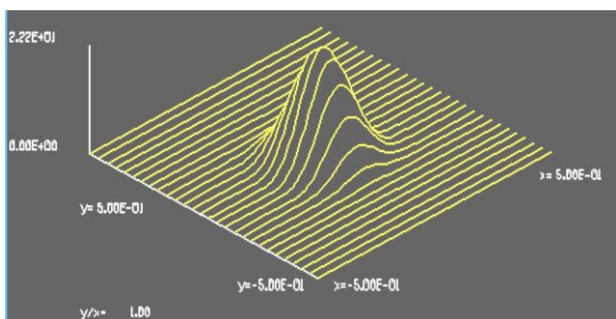
شکل ۱۲. مقایسه اندازه لکه بزرگ‌ترین و بالاترین مد ممکن در تشدیدگرهای تخت متقارن و مینا برای دو طول موج مختلف λ .



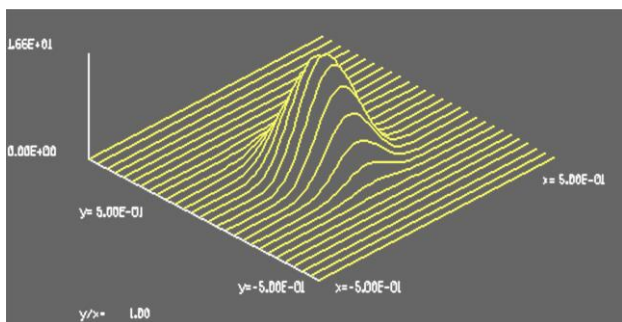
شکل ۹. حساسیت به ترازمندی با توان‌افزایی برای $k = 2$ انحراف 0.7λ در R_2 .



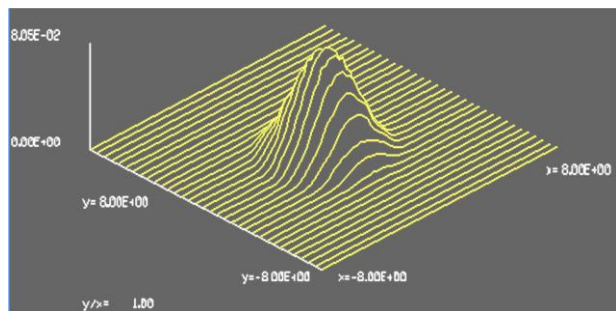
شکل ۱۴. مقایسه واگرایی برای مد اصلی و بالاترین مد در یک تشدیدگر (پایدار) دو میله‌ای تخت-مقارن، تناوبی با طول موج ۱۰۶۴ nm.



شکل ۱۵. نمایه گوسی روی آینه خروجی در تشدیدگر مینا پیشنهادی.



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

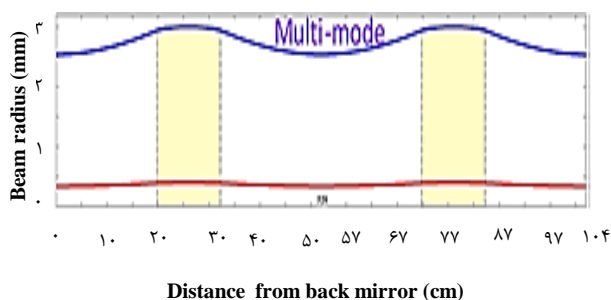


شکل ۱۷. نمایه گوسی و اندازه لکه در فاصله ۱۰ متری از تشدیدگر دومیله‌ای پربودیک پیشنهادی.

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 مقارن 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-مقارن ($f_1 = 350 \text{ mm}$) با 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 $f_1 = 350 \text{ mm}$ نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ توزیع میدان روی آینه خروجی و در فاصله ۱۰ متر از آن را برای یک تشدیدگر مینا 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 (پیر شده تا قطر میله) برای تشدیدگر تخت-مقارن پایدار-تناوبی دو میله‌ای $f_1 = 350 \text{ mm}$ ، $\lambda = 1064 \text{ nm}$

۴. نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از مدل توان انکساری توزیع‌یافته 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 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 محیط بهره و کیفیت باریکه خروجی بدون نیاز به محاسبات مجدد، به طور نظام‌مندی از روی طرح مینا اولیه قابل انجام است. کاهش قدرت فوکوس آینه‌ها و افزایش طول در این بازطراحی و توان‌افزایی می‌تواند عموماً به افزایش حساسیت به تنظیمات اپتیکی در توان‌های بالا منجر شود؛ ولی ثابت شد برای طرح مینا 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. از 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 توان‌افزایی با به کارگیری تشدیدگرهای چند میله‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفت. در انتها قابلیت یک تشدیدگر (دو میله‌ای) تناوبی براساس طرح میناء پیشنهادی، 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

- 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).
- R. Weber, B. Neuenschwander, H.P. Weber, *Thermal Effects in Solid-State Laser Materials*, *Optical Materials*, **11**, 245 (1999).
- 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).
- 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).
- R. Iffländer, H. Kortz, H. Weber, *Beam divergence and refractive power of directly coated solid state lasers*, *Optics Communications*, **29**, 223 (1979).
- 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).
- V. Magni, *Multi-element Stable Resonators Containing a Variable Lens*, *JOSA A*, **4**, 1962 (1987).
- 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).
- S. De Silvestri, P. Laporta, V. Magni, *Misalignment Sensitivity of Solid-State Laser Resonators with Thermal Lensing*, *Optics Communications*, **59**, 43 (1986).
- H. Razzaghi, et al. In: *Proceeding of the Annual Physics Conference of Iran*, (Tehran, August 23-26, 2004) 27-29 (In Persian).
- 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).
- H. Razzaghi, et al, *Highly Efficient Diode-End-Pumped Nd:YAG Composite Rod Laser*, *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, **7**, 321 (2013).
- 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 TEM₀₀ CW Diode-End-Pumped Nd:YAG Laser*, *Optics letters*, **18**, 116 (1993).

