

## افزایش حجم مد اصلی لیزر Nd:YAG و پایداری سازی لیزر نسبت به تنظیمات مکانیکی و نوسانات گرمایی در توان‌های بالای دمش

محمدرضا عبدالحسینی مقدم<sup>۱</sup>، داود رزاقی<sup>۲\*</sup>، محمد مهدی زاده اصفهانی<sup>۳</sup>، حسین رزاقی<sup>۴</sup>

۱ و ۲- استادیار، ۳ و ۴- کارشناس ارشد فیزیک، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

(دریافت: ۹۷/۰۳/۱۳، پذیرش: ۹۷/۰۷/۲۰)

### چکیده

موضوع تحقیق حاضر بررسی مزیت‌های یک نوع تشدیدگر پایدار خاص نسبت به تشدیدگر تخت متقارن در رژیم توان‌های بالا در لیزر Nd:YAG دمیده جانبی است. برای این منظور ابتدا بحثی در خصوص مزایا و معایب برخی از تشدیدگرهای متداول در لیزرهای پرتوان Nd:YAG ارائه شده است. در ادامه با به کارگیری مدل توان شکستی توزیع یافته برای یک میله لیزری Nd:YAG دمیده جانبی و بررسی نواحی پایداری، یک طرح تشدیدگری نامتقارن پیشنهاد شده است که تک مد عرضی است و نسبت به تشدیدگر تخت متقارن دارای حجم مد اصلی بسیار بالاتری (۱۲ برابر تشدیدگر تخت- متقارن) است. همچنین حساسیت نسبت به ناترازی این تشدیدگر تک مد عرضی، با محاسبات عددی و نیز شبیه‌سازی با نرم‌افزار، GLAD مطالعه و با یک تشدیدگر تخت- متقارن مقایسه شده است. نتایج این تحقیق نشان داده که در توان‌های بالای دمش نیز، می‌توان بدون افزودن المان‌های اپتیکی، حجم مد اصلی بالایی را به دست آورد و هم‌زمان تشدیدگر را نسبت به اختلالات مکانیکی و گرمایی پایدار ساخت.

**کلیدواژه‌ها:** لیزر Nd:YAG، تشدیدگر پایدار، عدسی گرمایی، حساسیت به تنظیم

## Increasing the Fundamental Mode Volume in Nd:YAG Laser and Stabilizing Against Mechanical and Thermal Disturbance in High Power Pumping Regime

M. A. Moghaddam, D. Razzaghi\*, M. Mahdizade Esfahani, H. Razzaghi

Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, Tehran

(Received: 03/06/2018; Accepted: 12/10/2018)

### Abstract

*The subject of this research is to investigating the advantages of a special stable resonator relative to the flat-symmetric stable resonator scheme in high power pumped Nd:YAG lasers. At first a discussion about some conventional resonators used in high power Nd:YAG lasers is presented considering the advantages and shortcomings of each resonator scheme. Then by using distributed refractive power model (DRP), for a typical high power side pumped Nd:YAG laser, and investigating the stability regions, a non symmetric resonator scheme is proposed which gives single transverse mode and demonstrates higher fundamental mode volume (12 times greater) compared with flat-symmetric scheme. Also misalignment sensitivity of the presented resonator has been studied and compared with flat-symmetric resonator, using numerical calculation and simulation with GLAD software. The results of this research revealed that in high level of pumped power, it is also possible to achieve high fundamental mode volume and make the resonator stable due to thermal and mechanical disturbance.*

**Keywords:** Nd:YAG Laser, Stable Resonator, Thermal Lens, Alignment Sensitivity

## ۱. مقدمه

جهت‌مندی بالای باریکه لیزری، نقش برجسته‌ای در ارتباطات لیزری، انتقال داده‌های نوری در فواصل دور و حتی شنود از راه دور دارد [۱]. برای محدود کردن واگرایی باریکه، لازم است که یک شعاع باریکه بزرگ از یک چشمه نوری باکیفیت بالا و یک تلسکوپ نوری باکیفیت بالا مورد استفاده قرار گیرد. البته جهت‌مندی بالا، نیازمند به‌دقت بالایی در تنظیم گیرنده و فرستنده است. بخصوص اگر گیرنده در زمین و سیگنال از ماهواره‌های دور ارسال گردد. داده‌ها را می‌توان در فضای آزاد تا بیش از صدها کیلومتر ارسال کرد [۴-۲]. همچنین می‌توان امنیت داده‌ها را با طرح‌های خاص از جمله رمزنگاری کوانتومی، بسیار بالا برد. اصولاً ماهواره‌ها سرویس‌های مختلفی را اعم از خدمات مخابراتی و جمع‌آوری داده‌های تصویری، پیش‌بینی هوا برای پیش‌هشداردهی مختلف فراهم می‌کنند. از طرف دیگر مفهوم لیزرهای فضایی در حال تکامل است که در آن ماهواره‌ها به لیزرهای پرتوان مجهز می‌شوند. سامانه‌های لیزری ضد ماهواره مستقر در زمین نیز در حال گسترش است [۵]. تحقیق حاضر در طراحی بهینه تشدیدگرهای لیزری حالت‌جامد، برای اثرگذاری از راه دور و انتقال هر چه بیشتر شدت پرتو بر هدف متمرکز است. در لیزرهای صنعتی و پردازشگر مواد، تک مد بودن و واگرایی کم به دلیل فاصله کم با هدف مورد پردازش، خیلی حیاتی نیست. اگرچه قابلیت تمرکز پذیری پرتو متأثر از کیفیت باریکه است. ولیکن تلاش برای تک مد کردن پرتوی لیزر بدون کاهش قابل‌توجه توان لیزر، یک امر حیاتی در اثرگذاری از راه دور در کاربردهای دفاعی است. با توجه به کاربرد لیزرهای توان بالا (در حد ۱۰۰ وات) در ارتباطات بین ماهواره‌ها [۲]، در این تحقیق یک لیزر پیوسته حدود ۳۰۰ وات Nd:YAG دمیده دیودی را ملاک محاسبات و طراحی تشدیدگر قرار داده‌ایم. با این حال اصول به‌کاررفته در این تحقیق منحصر به توان مذکور نیست و همچنین برای لیزرهای پالسی در رژیم‌های کاری مختلف که اثر لنز حرارتی در آن‌ها قابل‌توجه است، می‌تواند مورد استفاده واقع شود.

بسته به نیاز کاربر، از چند روش می‌توان برای ساخت یک تشدیدگر با باریکه خروجی تک مد عرضی ( $TEM_{00}$ ) بهره گرفت [۶-۱۰]. در برخی از این روش‌ها، توان ورودی خیلی قابل‌تغییر نیست، در برخی دیگر، میدان نزدیک، یکنواخت نیست. همچنین از تشدیدگرهای ناپایدار برای تک مدسازی عرضی استفاده شده است [۱۱]. در برخی موارد، از یک تشدیدگر در یک‌جهت پایدار و در جهت دیگر ناپایدار، استفاده می‌شود. یک چنین تشدیدگرهای ترکیبی، برای تولید باریکه‌های بیضوی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سادگی در تنظیم و حجم مد اصلی بالا از مزیت‌های

تشدیدگرهای ناپایدار است به شرط اینکه محیط فعال دارای بهره ذاتی بالایی باشد. به همین خاطر اگرچه در یک لیزر Nd:YAG در رژیم ناپیوسته، تشدیدگرهای ناپایدار به‌خوبی کار می‌کنند ولی در رژیم کاری (شبه) پیوسته، تشدیدگرهای ناپایدار به خاطر بهره پایین، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۲]. برای یک تشدیدگر پایدار با رژیم کاری پیوسته و کارکرد چند مدی، ساختار عرضی باریکه ترکیبی است از مدهای گوناگون مرتبه بالا که با افزایش انرژی یا توان دمش، کیفیت باریکه تغییر و عموماً کاسته می‌شود. با این وجود در این شرایط حتی در یک تشدیدگر ساده، بازدهی استخراج انرژی مناسب و توزیع میدان یکنواخت است. یکی از ایراداتی که به تشدیدگرهای پایدار وارد است، آن است که نمی‌توان در آن‌ها به‌سادگی در کارکرد تک مد اصلی، مد به‌اندازه کافی بزرگ با بازدهی شیب خروجی بالایی را شکل داد. حتی اگر چنین مدی نیز شکل داده شود، این مد به اختلالات عدسی گرمایی یا به ناترازمندی بسیار حساس خواهد بود. وابستگی مشخصه‌های باریکه داخلی و یا خروجی به توان دمش، نمونه‌ای دیگر از مشکلات سامانه‌های لیزری حالت‌جامد است که باید تعدیل شوند. در کارکرد پیوسته به دلایل مختلف از جمله مسائل حرارتی، جلوگیری از نوسانات مدهای مرتبه بالا، به‌سادگی به کمک یک روزنه امکان‌پذیر نیست. بخصوص آنکه برای توان‌های بالای ۲۰ وات این روزنه حتماً باید خنک شود. داشتن بازدهی بالا یا اندازه‌های لکه بزرگ در داخل میله، مجدداً با بکار گرفتن تشدیدگرهای خاص دارای عدسی‌ها و قطعات اپتیکی جبران‌کننده شکل می‌گیرد و در این حالت‌ها اگر معیار طراحی درست رعایت نشود تشدیدگر با کمترین انحراف از پارامترهای بهینه، به تنظیمات اپتیکی یا مکانیکی حساس می‌شود. این در حالی است که تنظیمات اپتیکی روزانه، یکی از معضلاتی است که باید از آن اجتناب شود. همچنین هرگونه نوسان در عدسی حرارتی، منجر به نوسانات گسترده در توزیع انرژی بین مدهای عرضی و ناپایداری مشخصات خروجی لیزر می‌شود.

این پژوهش به کنترل اثرات عدسی گرمایی القایی و اختلالات مکانیکی در یک تشدیدگر لیزری خطی حالت‌جامد با کارکرد تک مد عرضی می‌پردازد. هدف آن است که اثر مخرب عدسی متغیر داخلی با ارائه یک طرح ساده کنترل شود طوری که بازدهی لیزر به میزان زیادی در کارکرد تک مد عرضی افزایش یابد. برای این منظور از مدل توان شکستی توزیع یافته برای میله لیزری استفاده کرده‌ایم. پس از بررسی نواحی پایدار، یک طرح تشدیدگری نامتقارن پیشنهاد خواهد شد که تک مد عرضی است و نسبت به تشدیدگر تخت متقارن دارای حجم مد اصلی بسیار بالاتری است. همچنین پروفایل میدان خروجی دو تشدیدگر (تخت - متقارن و کوژ-کوژ نامتقارن)، برای فواصل دور

طریق  $\Gamma$  به توان دمش وابسته هستند:

$$-D_E = \frac{(1-n_0)\alpha R P_E \eta_H}{2KA\ell} \quad (۶)$$

$$\Gamma = \frac{2}{b} = \left( \frac{1}{n_0 \ell A} \right)^{\frac{1}{2}} (P_E)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{\eta_H}{K} \left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\varphi} n_0^3 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

در این روابط مقدار  $n_0$  ضریب شکست میله و مقدار  $dn/dT$  تغییرات ضریب شکست با دما، هر دو در مرکز میله برآورد می‌شوند. همچنین  $K$  ضریب انتقال حرارت،  $C_{r,\varphi}$  ضرایب فوتوالاستیک ماده و  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی است. در یک لیزر روند تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی لیزری با بازدهی‌های مختلفی همراه است. برای مثال همواره کسری از توان دمش، درون محیط فعال به گرما تبدیل می‌شود.  $\eta_H$  بازدهی گرمایی است که توان حرارتی را به توان الکتریکی مرتبط می‌سازد. تعاریف و مقادیر بقیه پارامترها به صورت جزء به جزء و دقیق در مراجع مشخص گردیده‌اند. تساوی  $A=D$  به معنی تساوی  $h=h_1=h_2$  است. باین حال مکان  $h=(1-D)/C$  با توان اپتیکی میله به صورت سینوسی تغییر می‌کند. هنگامی که میله لیزری به طور دقیق معادل سازی می‌شود برای رجوع به صفحات اصلی، بستگی توانی لحاظ می‌گردد. برای میله لیزری به طول  $\ell$  از صفحات مرجع ( $h$ )، ماتریس انتقال میله، به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D_{tot} & 1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

نوسانات  $P_E$ ، منبع تغذیه و نوسانات گرمایی همگی باعث نوسان  $D_{tot}$  خواهند شد. صرف نظر از نوسان، تابعیت عدسی گرمایی به توان، به مشخصات چشمه و هندسه دمش وابسته است. برای مثال در حالت پیوسته و دمش لامپی، اندازه‌گیری تجربی عدسی گرمایی نشان داده است که فاصله کانونی عدسی حرارتی به صورت  $f(m)P_{in}(kW) = 1.45$  به توان الکتریکی چشمه دمش وابسته است [۱۴]. در یک کاواک نوعی پنج‌وجهی، با افزایش توان دمش (از ۳۰۰ به ۱۰۰۰ وات)، فاصله کانونی عدسی گرمایی از ۱۵۰ به ۱۰ سانتیمتر کاهش می‌یابد. برای دستیابی به توان‌های بالا، معمولاً میله‌های بلند لیزری با طرح دمش از پهلوی، مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این پژوهش، نقاط کاری مدنظر همگی بر اساس مشخصات واقعی کاواک‌های دمیده از پهلوی و میله‌های قابل ساخت در داخل کشور انتخاب شده است [۱۵-۱۸].

در این نوع کاواک‌ها، توزیع دمش در میله به‌گونه‌ای است که

و نزدیک در حالت تنظیم کامل و نا تنظیمی، با استفاده از نرم‌افزار GLAD محاسبه و مقایسه شد. در بخش‌های آتی به جزئیات روند طراحی و نتایج حاصل از تحقیق خواهیم پرداخت.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مبانی علمی

هر سیستم اپتیکی دارای ماتریس عبور ABCD، از یک باریکه ورودی  $R_1$  با شعاع  $R_1$ ، یک باریکه خروجی  $R_2$  با شعاع  $R_2 = \frac{AR_1 + B}{CR_1 + D}$  می‌سازد [۱۳]. با بازنویسی این رابطه این سیستم اپتیکی به صورت یک عدسی ساده، می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$\frac{1}{R_2 - h_2} = \frac{1}{R_1 - h_1} - \frac{1}{f} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} h_1 = \frac{1-D}{C} \\ h_2 = \frac{A-1}{C} \\ f = \frac{1}{Df} = \frac{-1}{C} \end{cases} \quad (۲)$$

فواصل چشمه و تصویر در این رابطه دیگر  $R_i$  نیستند بلکه  $R_i-h_i$  می‌باشند. درواقع اگر فواصل از صفحات اصلی  $h_i$  پشت صفحات ورودی و خروجی سنجیده شوند، این سیستم دارای نقاط کانونی جلو و عقب  $FH_1$  و  $FH_2$  با فاصله کانونی  $F$  خارج صفحات اصلی خواهد بود [۱۳]. یک میله لیزری نیز دارای ماتریس انتقالی است که عناصر این ماتریس، با احتساب اثر انحناهای سطوح انتهایی و نیز اثرات تغییرات شکست (ناشی از حرارت و استرس)، به صورت زیر به توان الکتریکی چشمه دمش  $P_E$  مرتبط می‌شوند.

$$A = D = \cos \Gamma \ell - D_E \frac{\sin \Gamma \ell}{n_0 \Gamma} \quad (۳)$$

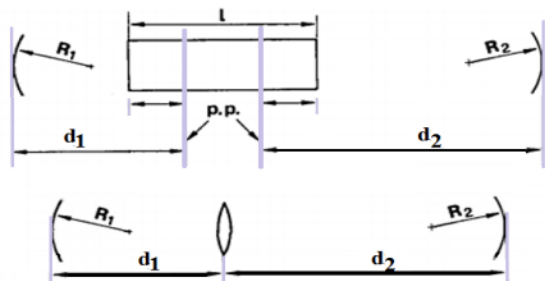
$$B = \frac{\sin \Gamma \ell}{n_0 \Gamma} \quad (۴)$$

$$C = -n_0 \Gamma \sin \Gamma \ell - 2D_E \cos \Gamma \ell + D_E \frac{2 \sin \Gamma \ell}{n_0 \Gamma} \quad (۵)$$

که در روابط فوق، اثر انحناهای سطوح انتهایی، از طریق توان شکست  $D_E$  و اثرات ناشی از حرارت و استرس در داخل میله، از

فضای پایداری به صورت زیر قابل تعیین است [۲۲]:

$$g_2^* = \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 \frac{u_2}{u_1} g_1^* + \frac{d_1}{d_2} \left( \frac{u_2}{u_1} - 1 \right) \quad (10)$$



شکل ۱. معادل سازی میله لیزری در تشدیدگرهای حالت جامد با یک عدسی داخلی متغیر [۲۱]

به خاطر بستگی عدسی گرمایی با توان، مختصات تشدیدگر در فضای پایداری به توان کاری مورد نظر بستگی دارد. منحنی های تحول توانی مشخصه های لیزری را نیز می توان با تغییر توان اپتیکی میله ها، مشاهده تغییر مختصات کاری تشدیدگر در فضای پایداری ( $g_1^*$  بر حسب  $g_2^*$ ) و پس از تعیین توان های شکستی بحرانی در این فضا، رسم نمود. از طرف دیگر در هر توان شکست از میله، به کمک مشخصات تشدیدگر قوانین انتشار، می توان اندازه لکه مد اصلی را در کل تشدیدگر محاسبه کرد. توان های شکستی که در آن، یکی از عناصر ماتریس انتقال تک عبور صفر شود، تشدیدگر را در مرز ناحیه ناپایداری قرار می دهد که توان های شکستی بحرانی  $D_i$  نامیده می شوند. در حالت کلی حداکثر چهار توان شکست بحرانی وجود دارد که کرانه های نواحی پایداری را تعیین می کنند. در حالت کلی تا دو ناحیه پایداری در یک مسیر خطی تحول می تواند وجود داشته باشد که می تواند به هم متصل باشد. مقادیر  $x$  برای این ۴ نقطه بحرانی عبارت اند از:

$$g_1 g_2 = 1 \begin{cases} x = 0 & g_1, g_2 < 0 \\ x = -\frac{1}{u_1} - \frac{1}{u_2} & g_1, g_2 > 0 \end{cases} \quad 9$$

$$\begin{aligned} g_1 = 0 &\rightarrow x = -u_1^{-1} \\ g_2 = 0 &\rightarrow x = -u_2^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

می توان نشان داد که اندازه لکه میان عدسی گرمایی ( $w_{30}$ )، به کمینه خود در وسط هر یک از این نواحی پایداری می رسد. اندازه لکه مد روی میله از طریق پهنای نواحی پایداری با رابطه زیر تعیین می شود [۲۳]:

شدت دمش در مرکز بیشینه باشد. بدین ترتیب بیشترین بازدهی جفت شدگی بین چشمه دمش و باریکه لیزری در مد اصلی حاصل می شود. در بخش بعدی تحول توانی تشدیدگر و نواحی پایداری را مورد بحث قرار می دهیم تا نقطه مناسب کاری مشخص گردد.

## ۲-۲. نواحی پایداری و تحول توانی تشدیدگر پایدار

برای تحلیل تشدیدگر، می توان از ماتریس پرتو برای انتشار میدان اپتیکی بین دو آینه بهره گرفت. با تعیین این ماتریس و تعریف پارامترهای تعمیم یافته برای پایداری هندسی تشدیدگر یعنی  $g_i^*$ ، می توان ماتریس تک عبور یک سیستم دارای عدسی گرمایی داخلی متغیر را به صورت زیر نوشت:

$$M = \begin{pmatrix} g_1^* & L^* \\ \frac{g_1^* g_2^* - 1}{L^*} & g_2^* \end{pmatrix} \quad (9)$$

بدین ترتیب، ماتریس رفت هر تشدیدگر حالت جامد، پارامترهای معادل ساز آن تشدیدگر را با یک تشدیدگر بدون اجزای داخلی معرفی می کند [۱۹]. برای یک تشدیدگر تک میله ای، تعاریف تعمیم یافته  $g_i^*$  و  $L^*$  در جدول (۱) مشخص شده اند:

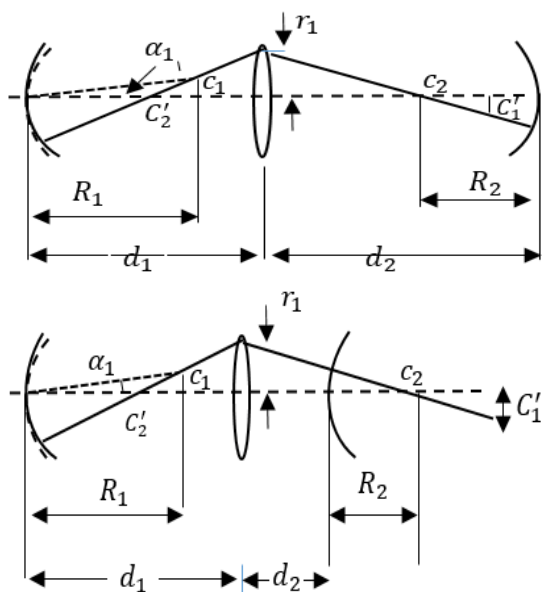
جدول ۱. تعاریف مختلف از پارامترهای تعمیم یافته در تشدیدگرهای لیزری با عدسی داخلی [۲۰]

$g_i^* = g_i - Dd_j \left( 1 - \frac{d_i}{R_i} \right)$	$g_i^* = 1 - \frac{L^*}{R_i} - Dd_j$	$g_i^* = \frac{-d_j}{d_i} (1 + xu_i)$
$g_i = 1 - \frac{d_1 + d_2}{R_i}$	$L^* = d_1 + d_2 - d_1 d_2 D$	$x = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}$
$D = \frac{1}{f}$	$D = \frac{1}{f}$	$u_i = d_i \left( 1 - \frac{d_i}{R_i} \right)$
		$L^* = -d_1 d_2 x$

در این جدول  $d_i$  فاصله صفحه اصلی عدسی گرمایی، نسبت به آینه نام با شعاع انحنای  $R_i$  است، به شکل (۱) رجوع شود. این تعاریف در حالت حدی  $D=0$ ، مشخصه ها و پارامترهای تشدیدگر بدون عدسی داخلی را نشان می دهند. در این حالت

حدی  $L^* = d_1 + d_2 = L$  است. باین حال در حالت کلی ( $D \neq 0$ )، تساوی مقادیر متناظر از  $g_i^*$  و  $L^*$  در دو تشدیدگر بدون میله و دارای میله لیزری، منجر به وضعیت یکسان در شرایط پایداری و تساوی اندازه لکه روی آینه های متناظر در مد اصلی می شود. بر این اساس تابعیت دیگر روابط بر حسب پارامترهای تعمیم یافته بدون تغییر می ماند. با حذف  $x$  از معادلات جدول (۱)، مسیر تحول توانی تشدیدگر و حرکت آن در

محور مد از میان مراکز انحنای هر دو آینه بگذرد. وقتی آینه‌ها از وضعیت تنظیم کامل خود، خارج شوند، محور مد حرکت می‌کند و اگر داخل تشدیدگر روزنه‌هایی موجود باشد، اتلاف پراش بیشتر می‌شود. در یک تشدیدگر دارای عدسی گرمایی، وضعیت عمدتاً به این خاطر متفاوت است که دهانه محدود کنند خود میله لیزری است [۲۵-۲۸]. اگر فرض شود که آینه‌ها اندازه نامحدودی دارند اتلاف پراش ناشی از برهم خوردن تنظیم، عمدتاً از جابجایی لکه مد در میله حاصل می‌شود. از نظر فیزیکی اتلاف برهم خوردن تنظیم، به‌نوعی تابعی از جابجایی محور مد نسبت به ابعاد لکه مد است. بر این اساس دو عامل حساسیت‌پذیری آینه‌ها ۱ و ۲ تعریف کرد که در آن به ترتیب  $d_1$  یا  $d_2$  جابجایی محور مد بر روی میله به سبب یک چرخش با زاویه  $\alpha_1$  یا  $\alpha_2$  بر روی آینه‌های ۱ و ۲ است. اگر تنها آینه ۱ با زاویه  $\alpha_1$  جابجا شود این جابجایی به‌صورت شکل (۲) محور مد را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.



شکل ۲. محور جدید مد، در یک تشدیدگر از تنظیم خارج شده [۲۳]

فرض بر آن است که، شرایط پایداری دینامیکی تشدیدگر، از نظر اپتیکی حاصل شده باشد. یعنی اندازه مد روی عدسی گرمایی، کمینه مقدار خود را به ازای توان موردنظر دارد. در این شرایط، درون ناحیه پایداری، کند تغییر است، بنابراین این انتظار می‌رود که مقدار  $S_1$  و  $S_2$  خیلی از  $w_3$  تأثیر نپذیرند. حساسیت نسبت به عدم تنظیم هر آینه برای یک تشدیدگر موردنظر به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$w_{30}^2 = \frac{2\lambda}{\pi} \frac{1}{\Delta(1/f)} \quad (12)$$

این رابطه بدان معناست که با کاهش حوزه پایداری، مقادیر بزرگ‌تری را برای  $w_{30}$  و در نتیجه حجم مدی فعال، می‌توان انتظار داشت. برای لیزرهای تپی، این معادله حد بالایی برای مقادیر  $w_{30}$  را تعیین و مشخص می‌کند، زیرا ناحیه پایداری می‌بایست به‌اندازه کافی برای گرفتن تغییرات کل فاصله کانونی در حین تپ، بزرگ باشد. پس از مطالعه نواحی پایداری، لازم است حساسیت تشدیدگر به اختلالاتی نظیر ناترازمندی و تغییرات عدسی گرمایی موردتوجه قرار گیرد، که در ادامه به این موضوع می‌پردازیم.

### ۳-۲. پایداری‌سازی دینامیکی تشدیدگر نسبت به نوسانات فاصله کانونی و حساسیت تنظیم

برای پایداری‌سازی دینامیکی تشدیدگر از نظر اپتیکی در عملکرد مد اصلی، اندازه لکه باریکه لیزری در میله نسبت به تغییرات فاصله کانونی باید غیر حساس شود. در این حالت مشتق اندازه لکه نسبت به‌عکس فاصله کانونی صفر می‌شود [۲۲]. این شرط به ازای یک  $f$  یا  $x_0$  یا توان ورودی خاص، برقرار خواهد بود:

$$(x_0)_{I,II} = -\frac{1}{2u_2} \left( 1 + \frac{u_2}{u_1} \mp \sqrt{1 - \left( \frac{u_2}{u_1} \right)^2} \right) \quad (13)$$

که از آن به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$\frac{1}{f_0} = x_0 + \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \quad (14)$$

در معادله ۱۳، علامت منفی،  $x_0$  را برای ناحیه I پایداری و علامت مثبت، مقدار  $x_0$  را برای ناحیه II تعیین می‌کند. چون روی میله، اختلاف اندازه لکه کمینه با مقدار آن در وسط ناحیه پایداری، بسیار ناچیز است، بنابراین با تقریب بسیار خوبی می‌توان روابط زیر را برای  $x_0$  نوشت:

$$x_{1/2-II} \approx -\frac{1}{u_2} - \frac{1}{2u_1}, \quad x_{1/2-I} \approx -\frac{1}{2u_1} \quad (15)$$

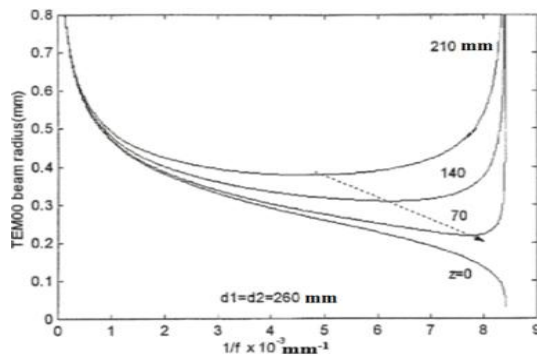
برای مثال در یک تشدیدگر نوعی تخت-مقارن، اندازه لکه در وسط ناحیه پایداری (I یا II) حداکثر 1.07 اندازه لکه کمینه است. این موضوع در شکل (۴) مشخص است. برای پایداری‌سازی مکانیکی تشدیدگر باید ملاحظات در نظر گرفته شود [۲۴-۲۰]. معمولاً در یک تشدیدگر بدون میله، حساسیت به تغییرات زاویه آینه‌ها با این حقیقت که محور مد می‌بایست عمود بر سطح هر دو آینه باشد مرتبط می‌شود. این خود الزاماً بدین معنی است که

موردنظر کمینه باشد. کار در ناحیه I پایداری نسبت به II به خاطر حساسیت کمتر به تنظیمات مکانیکی ارجح تر است زیرا با افزایش توان منحنی‌ها دارای مجانب نیستند [۲۳].

### ۳. نتایج و بحث

شکل (۳)، تحول توانی اندازه لکه مد اصلی را، در نقاط مختلف از یک تشدیدگر ساده تخت-مقارن نظیر تشدیدگرهای ساخته شده [۱۵-۱۸]، نمایش می‌دهد. در اینجا فاصله آینه‌ها تا صفحات اصلی میله ۲۶۰ mm در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شعاع لکه مد اصلی روی میله در میانه ناحیه پایداری به مقدار ۰/۳۸ mm نزدیک می‌شود.

در چنین چیدمانی، لیزر در کارکرد چند مدی عمل می‌کند و مدهای مرتبه بالاتر، شعاع میله را پر می‌کنند. اندازه لکه مد اصلی روی آینه‌ها برای یک توان کاری درست میانه ناحیه پایداری، کوچک‌تر از ۰/۳ mm است.



شکل ۳. شعاع باریکه محاسبه شده مد اصلی، در تشدیدگر تخت مقارن

در این محاسبات، میله لیزری به قطر ۵ mm و طول ۱۰۰ mm در یک کاواک لیزری دمیده دیودی از پهلوی دمشی شده است. همچنین طول دمش مؤثر بر روی میله، به خاطر محدودیت‌های مکانیکی و طول کوچک‌تر دیود بارها، به اندازه ۶۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۱۵-۱۸].

در قسمت‌های الف و ب شکل (۴)، مقادیر چهار توان (شکست اپتیکی) بحرانی را برای تشدیدگرهای مختلف هم طول در کارکرد تک مد عرضی نمایش می‌دهد. در شکل نشان داده شده است که ترکیب‌های مختلفی از (di, Ri) می‌تواند انتخاب شود. در تمام این چیدمان‌ها، طول فیزیکی تشدیدگر ۵۲۰ mm و قطر میله ۵/۴ mm است. همچنین اندازه شعاع لکه روی میله ۱/۵ mm ثابت است. البته می‌توان نسبت قطر لکه به قطر میله را (که در اینجا ۱/۶۶ است) به مقدار ۲ نیز نزدیک کرد.

این شکل‌ها تغییرات توان‌های اپتیکی کرانی یا بحرانی  $1/f_1$  و  $1/f_2$  را در ناحیه II، برحسب مکان میله نشان می‌دهند. به‌طور

$$S_i = \frac{1}{w_{30}} \frac{R_i}{d_i - R_i} \left( \frac{1}{d_i - R_i} + \frac{1}{d_j - R_j} - \frac{1}{f} \right)^{-1} \quad (16)$$

که با تقریب زوایای کوچک و تعاریف  $u_1, u_2, x$  خواهیم داشت:

$$S_i = \frac{1}{w_{30}} \frac{d_i}{u_i} \frac{1}{\frac{1}{u_i} + \frac{1}{u_j} + x} \quad (17)$$

بدیهی است که حساسیت کلی به صورت  $S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$  باید تعریف شود. همچنین از رابطه (۱۷) واضح است که حساسیت S در یکی از لبه‌های منطقه II به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. بدین ترتیب بهتر است از قرارگیری در ناحیه II و افزایش فزاینده S در اثر تغییر در f، پرهیز شود. دلیل فیزیکی برای این رفتار آن است که در این نقطه بحرانی، مراکز انحنای آینه‌ها به‌وسیله عدسی‌ها روی یکدیگر تصویر می‌شوند. بدین ترتیب حتی یک چرخش کوچک و جابجایی کوچک آینه‌ها، محور مد را که در یک تشدیدگر تنظیم شده کاملاً افقی است، به وضعیت عمودی تبدیل می‌کند. علت زیاد بودن، حساسیت به تنظیم تشدیدگرهای هم‌مرکز بدون عدسی داخلی نیز همین امر است.

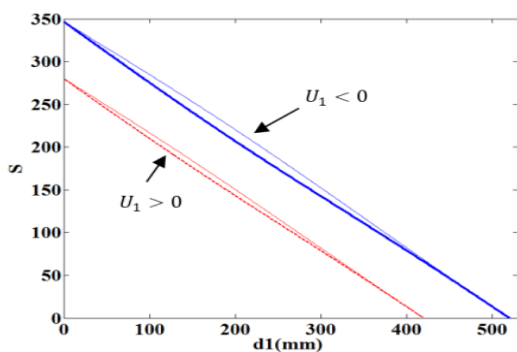
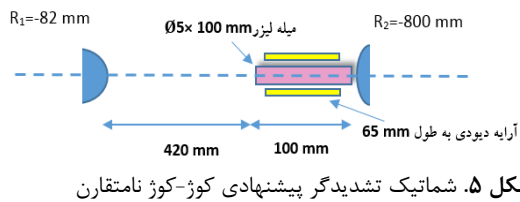
یکی دیگر از اصولی که مدنظر قرار می‌گیرد و در این تحقیق رعایت شده است آن است که برای به دست آوردن توان خروجی بالا و بهره بالا، باید حجم مد داخل میله هر آنچه ممکن است بزرگ‌تر شود.

درواقع برای تعیین یک پیکره تشدیدگری با توان کاری مشخص ( $D_{tot} = I/f$ )، چهار درجه آزادی  $R_i, d_i$  نیاز است که با رعایت چهار شرط، انتظار یک جواب، معقول به نظر می‌رسد. شروط تعیین‌کننده این چهار درجه آزادی، عبارت‌اند از:

- توان ورودی اعمال شده به چشمه دمش که با توان شکست یا فاصله کانونی عدسی گرمایی  $f_0$  مرتبط است، معلوم باشد. این مقدار در حالت کلی بیشینه توان مجاز سیستم را بیان می‌کند.
- مقدار (پایدار) اندازه لکه در میله ( $w_{30}$ ) برای عملکرد تک مد عرضی که توسط شعاع روزنه یا همان میله محدود و تعیین می‌شود. شعاع میله باید  $1/2$  تا  $2$  برابر، اندازه لکه بر روی میله باشد [۲۹].
- طول تشدیدگر  $L = d_1 + d_2$ ، ثابت و از قبل معین است. با تقریب عدسی گرمایی به‌صورت عدسی ضخیم، طول فیزیکی تشدیدگر، با افزودن فاصله بین صفحات اصلی به این مقدار محاسبه می‌شود.
- حساسیت به عدم تنظیم برای توان شکست گرمایی یا  $f_0$

تشدیدگر پیشنهادی با میله‌ای به قطر  $\Delta$  mm را نشان می‌دهد

در شکل (۶) منحنی حساسیت نسبت به عدم تنظیم  $S_{1/2}$ ، برحسب مکان میله ( $d_1$ ) رسم شده است که نشان می‌دهد حساسیت به تنظیم، با افزایش  $d_1$  کاهش می‌یابد. برای  $U_1 > 0$ ،  $d_1 = 420$  mm، مقادیر شعاع آینه‌ها به ترتیب  $R_1 = -82$  mm و  $R_2 = -800$  cm محاسبه می‌شود.

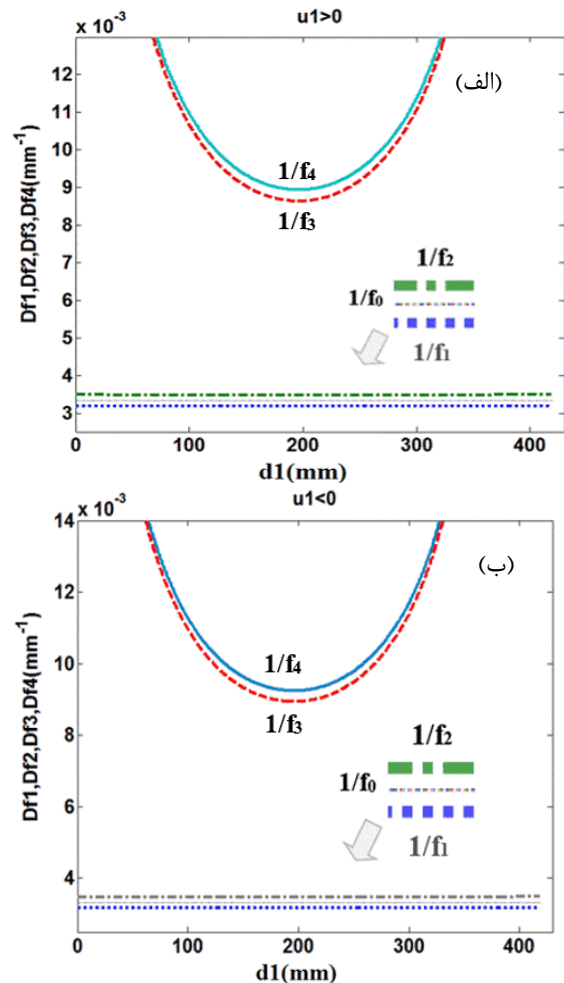


شکل ۶. حساسیت به تنظیم  $S_{1/2}$  در دو طول مختلف از تشدیدگر برای مقادیر ثابت از قطر میله  $\Delta$  mm، طول میله ۱۰۰ mm و فاصله کانونی ۳۰ cm

شبیه‌سازی با نرم‌افزار GLAD برای این مقادیر، توزیع شدت بین مدهای خروجی را برای میدان نزدیک در شکل (۷) و برای میدان دور در شکل (۸) نشان می‌دهد که نشان می‌دهد که تشدیدگر به خوبی در کارکرد تک مد عرضی کار می‌کند. شعاع لکه روی آینه خروجی در این حالت  $1/410$  mm محاسبه شده است که در تطابق بسیار خوب با محاسبات تحلیلی است ( $1/409$  mm). زیرا داشتن یک اندازه لکه  $1/5$  mm روی میله، پیش‌فرض شبیه‌سازی با نرم‌افزار Matlab بوده است.

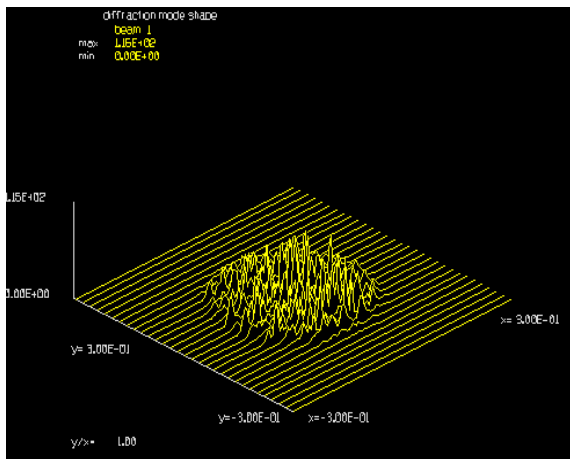
به کمک نرم‌افزار GLAD، با انتشار ۱۰ متری باریکه در فضای آزاد، شعاع لکه  $1/92$  cm در میدان دور محاسبه گردید، شکل (۹). به این ترتیب زاویه واگرایی کل پرتوی  $TEM_{00}$  در تشدیدگر حدود  $3/5$  میلی رادیان برآورد خواهد شد. لازم به توضیح است که واحد محورهای مختصات در اشکال (۷) الی (۱۰)، سانتی‌متر است. به منظور ارزیابی کیفیت طرح ارائه شده، این تشدیدگر را با تشدیدگر تخت-مقارن هم طول، با ابعاد آینه و میله یکسان مقایسه کردیم. شکل (۱۰) به وضوح نشان می‌دهد که عملکرد لیزری برای تشدیدگر تخت-مقارن، چند مدی است. برای تک مد کردن عملکرد تشدیدگر تخت مقارن، باید در محل

متفاوت، توان‌های اپتیکی بحرانی در ناحیه I پایداری، مستقل از مکان میله به دست آمده است. در این میان توان کاری یا فاصله کانونی ۳۰ cm (به ازای توان دمش ۸۰۰ وات) در وسط ناحیه پایداری باریک I، تنظیم شده است تا حساسیت به اختلالات گرمایی و مکانیکی کمینه باشد. محاسبات برای دو علامت مختلف ممکن از  $U_1 = \frac{\pm\pi}{2\lambda} w_{30}^2$  در این شکل‌ها از یکدیگر تفکیک شده است.



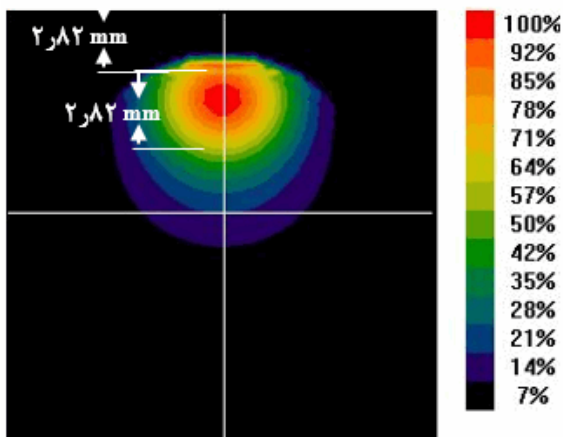
شکل ۴. امکان کارکرد تک مد عرضی در ترکیب متنوعی از  $(d_1, R_i)$  برای طول تشدیدگر ۵۲۰ mm، قطر میله  $\Delta$  mm، طول میله ۱۰۰ mm و  $f_0 = 30$  cm با علامت‌های مختلف  $U_1$

حتی با انتخاب درستی از شعاع آینه‌ها، هنگامی که میله به یک فاصله از دو آینه قرار گرفته باشد ( $d_1 = d_2$ )، دو ناحیه پایداری کوچک با شکاف ناپایداری بزرگ قابل تولید است. یعنی برای هر وضعیتی از مکان میله یک اندازه لکه بهینه و مشخص بر روی میله قابل شکل‌گیری است. با این حال وضعیت حساسیت به تنظیم برای این حالات و همچنین اندازه لکه روی آینه‌ها و واگرایی برای حالت‌های مختلف متفاوت است. شکل (۵) شماتیک



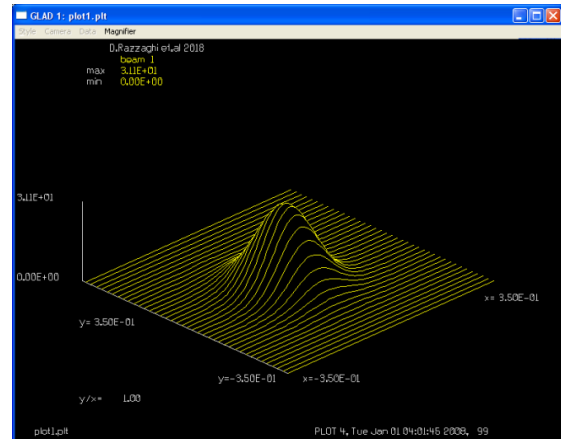
شکل ۱۰. توزیع شدت میدان برای تشدیدگر تخت- متقارن بدون روزنه (توزیع مالتی مدی یا چند مدی)

شکل های (۱۱) و (۱۲)، پروفایل باریکه خروجی دو تشدیدگر را به ازای عدم تنظیم حدود نصف طول موج، با یکدیگر مقایسه می کند. بدیهی است مقایسه دقیق حساسیت به تنظیم، برای ابعاد روزنه مساوی در دو تشدیدگر باید صورت گیرد [۳۰] و اصولاً برای تشدیدگر با روزنه کوچکتر حساسیت کمتری نسبت به عدم تنظیم انتظار می رود ضمن اینکه قطر لکه بزرگتر در میله، این حساسیت را باید افزایش دهد. بدین ترتیب باید انتظار داشت که در یک تشدیدگر تخت- متقارن، امکان برش پروفایل شدت بسیار کمتر باشد. با این حال (در این انحراف آینه ها به یک میزان) باید به مقیاس های طولی متفاوت در دو شکل دقت کرد. این نتایج به وضوح نشان می دهند که تشدیدگر مطرح شده در این مقاله ضمن برتری حجم مد اصلی، که طبق محاسبات، حدود ۱۲ برابر بزرگتر از تشدیدگر تخت- متقارن است، حساسیت تقریباً یکسانی نسبت به تنظیم در مقایسه با تشدیدگر تخت- متقارن دارد.

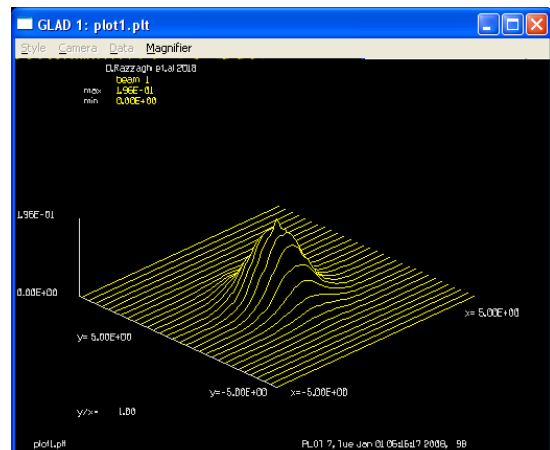


شکل ۱۱. تغییر پروفایل مد اصلی روی آینه خروجی با عدم تنظیم آینه ها در یک تشدیدگر تخت- متقارن تک مد شده با روزنه

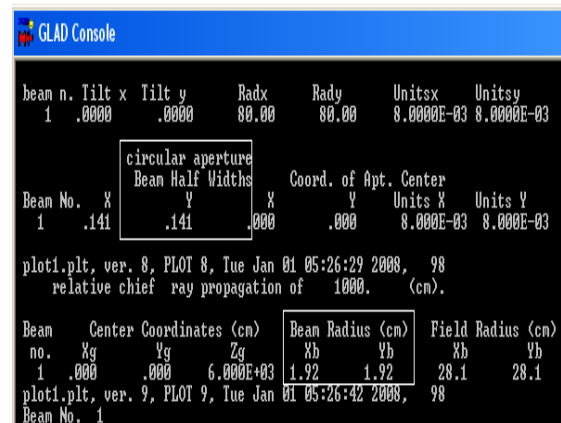
آینه ها از روزنه به قطر ۰/۵ میلی متری استفاده کرد. حتی با تک مد کردن تشدیدگر تخت- متقارن که باعث از دست رفتن بخش عمده ای از توان خروجی لیزر خواهد شد، حساسیت به ترازمندی بهتری نسبت به طرح تشدیدگر ارائه شده در این تحقیق به دست نمی آید



شکل ۷. شبیه سازی توزیع شدت میدان با استفاده از نرم افزار GLAD در فواصل نزدیک



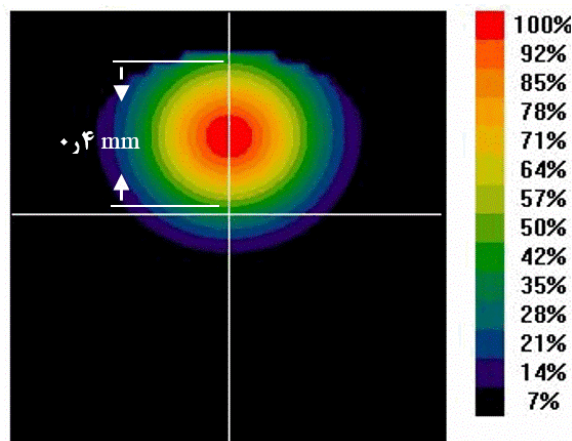
شکل ۸. شبیه سازی توزیع شدت میدان با استفاده از نرم افزار GLAD در میدان دور



شکل ۹. داده های باریکه TEM<sub>00</sub> طرح پیشنهادی، بلافاصله پس از آینه خروجی و پس از ۱۰ متر انتشار در محیط آزاد



- Commun. Survey & Tutorials 2017, No. arXiv: 1705, 10630.
- [3] Sodnik, Z.; Lutz, H.; Furch, B.; Meyer, R. "Optical Satellite Communications in Europe"; Proc. SPIE, Free Space Laser Comm. Tech. XXII 2010, 7587.
- [4] Pribil, K.; Flemmig, J. "Solid State Laser Communications in Space (SOLACOS) High Data Rate Satellite Communication System Verification Program"; Proc. SPIE, Space Instrum. and Spacecraft Optics 1994, 39-49.
- [5] Mahajan, V. "Chinese Anti-Satellite Means: Criticality and Vulnerability of Indian Satellite"; CLAWS Journal 2016, 183-188.
- [6] Driedger, K.; Iffländer, R.; Weber, H. "Multirod Resonators for High-Power Solid-State Lasers with Improved Beam Quality"; IEEE J. Quantum Elect. 1988, 24, 665-674.
- [7] Razzaghi, H.; Hajiesmaeilbaigi, F.; Sabouri-Dodaran, A. A.; Hasani-Barbaran, J.; Mahdizadeh, M.; Razzaghi, D.; Moghaddam, M. M. "Highly Efficient Diode-End Pumped Nd:YAG Composite Rod Laser"; OptoElectron. Adv. Mat. 2013, 7, 321-324.
- [8] Upadhyaya, B.; Misra, P.; Ranganathan, K.; Vishwakarma, S. C.; Golghate, H. N.; Choubey, A.; Muthukumar, N.; Jain, R. K.; Mundra, G.; Nathan, T. P. S. "Beam Quality Considerations of High Power Nd: YAG Lasers"; Opt. Laser Technol. 2002, 34, 193-197.
- [9] Hodgson, N.; Bostanjoglo, G.; Weber, H. "Multirod Unstable Resonators for High-Power Solid-State Lasers"; Appl. Optics 1993, 32, 5902-5917.
- [10] Tidwell, S. C.; Seamans, J. F.; Bowers, M. S. "Highly Efficient 60-W TEM00 CW Diode-End-Pumped Nd:YAG Laser"; Optics Lett. 1993, 18, 116-118.
- [11] Morin, M.; Poirier, M. B. "Graded Reflectivity Mirror Unstable Laser Resonator Design in Laser Resonators"; Proc. SPIE. 3267, Laser Resonator 1998, 52-66.
- [12] Morin, M. "Misalignment Sensitivity of Unstable Resonators with an Internal Lens"; Proc. SPIE 2041, Mode-Locked and Other Ultrashort Laser Designs, Amplifiers, and Applications 1994, 298-310.
- [13] Siegman, A. E. "Lasers"; University Science Books, Mill Valley, 1986.
- [14] Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Moghaddam, M. M.; Hajiesmaeilbaigi, F. "Second Harmonic Generation in a Flashlamp Pumped Nd:YAG Laser with 70% Optic to Optic Efficiency"; Proc. Conf. Optics & Photonics 2002, 15-18.
- [15] Hajiesmaeilbaigi, F.; Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Moghaddam, M. M. "High-Average-Power Diode-Side-Pumped Double Q-Switched Nd:YAG Laser"; Laser Phys. Lett. 2006, 4, 261-264.
- [16] Hajiesmaeilbaigi, F.; Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Moghaddam, M. M.; Sabbaghzadeh, J. "Experimental Study of a High-Power CW Diode-Side-Pumped Nd:YAG Rod Laser"; Laser Phys. Lett. 2005, 2, 437-439.
- [17] Hajiesmaeilbaigi, F.; Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Ruzbehani, M. "Design and Construction of a 110 W Green Laser for Medical Application"; Opt. Laser Technol. 2011, 43, 1428-1430.
- [18] Hajiesmaeilbaigi, F.; Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Moghaddam, M. M.; Sabbaghzadeh, J. "300 Watt Diode Pumped Nd:YAG Laser"; The Proc. Conf. of Physical Society of Iran 2004, 27-30.



شکل ۱۲. تغییر پروفایل مد اصلی روی آینه خروجی با عدم تنظیم آینه‌ها در تشدیدگر طراحی‌شده در این مقاله

#### ۴. نتیجه‌گیری

در تشدیدگرهای پایدار داشتن یک مد اصلی به‌اندازه کافی بزرگ به قیمت حساسیت زیاد به اختلالاتی چون عدسی گرمایی یا به تنظیم‌پذیری، تمام می‌شود. همچنین تلاش برای افزایش حجم مد داخل میله، منجر به کاهش گستره نواحی پایداری تشدیدگر می‌گردد. با این حال، در میان هر دو ناحیه پایداری ممکن، نقاط کاری یافت می‌شوند که در آن‌ها حجم مد اصلی تغییرات کمی را تجربه می‌کند. پاسخ این دو ناحیه پایداری نسبت به تنظیمات مکانیکی و به تنظیم‌پذیری، متفاوت است. در این تحقیق، از ناحیه پایداری I و قرار دادن نقطه کاری لیزر در این ناحیه برای تسهیل شرایط تنظیم تشدیدگر بهره گرفته شد. برای مکان‌های مختلف میله، حساسیت تشدیدگر به عدم تنظیم به کمک نرم‌افزار MATLAB و برنامه GLAD، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. در این راستا یک تشدیدگر کوژ-کوژ نامتقارن با عدسی گرمایی داخلی متغیر، برای داشتن باریکه خروجی تک مد (عرضی) پیشنهاد شد. پس از مشخصه‌یابی این طرح، حساسیت آن به تنظیم در یک توان کاری موردنظر با یک طرح ساده تخت متقارن مقایسه شد. ثابت شد که با انتخاب درست فواصل میله و شعاع آینه‌ها می‌توان حجم مد اصلی را نسبت به یک تشدیدگر تخت-متقارن، تا دوازده برابر افزایش داد. بدین ترتیب، عملکرد تک مد با بیش‌ترین بازدهی همچنین بیش‌ترین پایداری گرمایی و مکانیکی به نمایش گذاشته شد.

#### ۵. مراجع‌ها

- [1] Vaziri, S. A.; Marandi, H.; Khalilzadeh, J. "Passive Countermeasure Methods with Laser Listening"; Passive Defense Quarterly 2015, 6, 1-4.
- [2] Hemani, K.; Kaddoum, G. "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques"; IEEE

- [19] Kortz, H. P.; Weber, H. "Diffraction Losses and Mode Structure of Equivalent TEM<sub>00</sub> Optical Resonators"; *Appl. Optics* 1981, 20, 1936-1940.
- [20] Kogelnik, H. "Imaging of Optical Modes-Resonators with Internal Lenses"; *Bell Labs Technical Journal* 1965, 44, 455-494.
- [21] Feng, Y.; Bi, Y.; Xu, Z.; Zhang, G. "Thermally Near-Unstable Cavity Design for Solid State Lasers"; *Proc. SPIE, Laser Resonators and Beam Control VI* 2003, 4969, 227-233.
- [22] Koechner, Walter. "Solid-State Laser Engineering. Vol. 1"; Springer, 2013.
- [23] Magni, V. "Multielement Stable Resonators Containing a Variable Lens"; *J. Optical Soc. America A: Optics, Image Science, and Vision* 1987, 1962-1969.
- [24] Silvestri De, S.; Laporta, P.; Magni, V. "Misalignment Sensitivity of Solid-State Laser Resonators with Thermal Lensing"; *Optics Commun.* 1986, 59, 43-48.
- [25] Hong, C.; Jhon, S. S. C. "High Stability Resonator for Pulsed Solid State Lasers"; *Jpn. J. Appl. Phys.* 1997, 36, 6761-6763.
- [26] Hodgson, N.; Weber, H. "Misalignment Sensitivity of Stable Resonators in Multimode Operation"; *Journal of Modern Optics* 1992, 39, 1873-1882.
- [27] Darryl, N.; Ait-Ameur, K.; Litvin, I.; Fromager, M.; Forbes, A. "Observing Mode Propagation Inside a Laser Cavity"; *New Journal of Physics* 2012, 14, 053021.
- [28] Piche, M.; Lavigne, P.; Martin, F.; Belanger, P. A. "Modes of Resonators with Internal Apertures"; *Appl. Optics* 1983, 22, 1999-2006.
- [29] Laporta, P.; Brussard, M. "Design Criteria for Mode Size Optimization in Diode-Pumped Solid-State Lasers"; *IEEE J. Quantum Elect.* 1991, 27, 2319-2326.
- [30] Wang, L. Y.; Stephan, G. "Transverse Modes of an Apertured Laser"; *Appl. Optics* 1991, 30, 1899-1910.