



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. ۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



## طراحی تشدیدگر تلسکوپی کاو-کوژ جهت بهبود کیفیت باریکه لیزر حالت جامد Nd:YAG

مریم گلی حسنلو<sup>۱</sup>، مهدی شایگان منش<sup>۱</sup>، داوود رزاقی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران، ایران

<sup>۲</sup>پژوهشکده فوتونیک و فن آوری های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، صندوق

پستی، 11155-3486

چکیده - در این مقاله طراحی تشدیدگر تلسکوپی به منظور ایجاد حجم مدی بالا معرفی شده است. ما طراحی تشدیدگر را به کمک معادلات باریکه گاوسی به گونه‌ای انجام داده‌ایم که تغییرات فاصله کانونی میله لیزر ناشی از گرمای ناخواسته کمترین تأثیر را در حجم مد  $TEM_{00}$  داشته باشد. ما ویژگی‌های تشدیدگر تلسکوپی در لیزر Nd:YAG را بررسی کرده و طراحی لازم جهت بیشینه کردن مد  $TEM_{00}$  را انجام داده‌ایم، نتایج نشان می‌دهد برای حالتی که  $g_1^* \times g_2^* = \frac{1}{2}$ ، قطر لکه مستقل از شعاع انحنای آینه‌ها است. سپس به کمک روش ماتریس ABCD حجم مد را محاسبه کردیم.

کلیدواژه- تشدیدگر پایدار تلسکوپی، لنز حرارتی، لیزر Nd:YAG، ماتریس ABCD، حجم مد  $TEM_{00}$

## Stable telescopic resonator convex-concav for improvement of Nd:YAG solid-state laser beam quality

<sup>1</sup>Goli Hasanlo Maryam, <sup>1</sup>Shayganmanesh Mahdi, <sup>2</sup>Razzaghi Davood

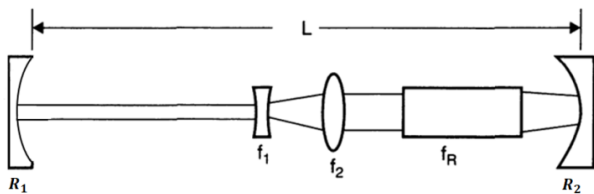
<sup>1</sup>Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Narmak, Tehran Iran

<sup>2</sup>Photonics and Quantum Technologies Research School, NSTRI, 11155-3486, Tehran, Iran

Abstract- - In this paper, telescopic resonator is introduced which is a valuable design due to creating a high mode volume. We designed the resonator based on the Gaussian beam theory in such a way that the change in focal length of the laser rod due to unwanted heat and telescope defocusing have the least effect on the  $TEM_{00}$  mode volume. we properties of the telescopic resonator in a Nd:YAG laser has been investigated and the  $TEM_{00}$  mode is maximized. the results show that for  $g_1^* \times g_2^* = \frac{1}{2}$ , the spot size is independent of the mirrors' curvature radius. We calculated with ABCD matrix in order to achieve the mode volume.

Keywords: Stable telescopic resonator, thermal lensing, Nd:YAG laser, ABCD matrix, volume mode  $TEM_{00}$

نظر شامل دو آینه کاو و کوژ، تلسکوپ عبوری و محیط فعال Nd:YAG به صورت میله است که در شکل (۱) آمده است.



شکل ۱: چیدمان آزمایشگاهی تشدیدگر تلسکوپی [2],[5],[6]

عدسی‌های تلسکوپ با فاصله کانونی  $f_1$  و  $f_2$  با فاصله  $d+\delta$  و  $d=f_1+f_2$  مقدار غیرکانونی تلسکوپ) از هم قرار دارند [۶].

برای میله لیزر Nd:YAG به طولده سانتی‌متر و شعاع سه میلی‌متر، مقدار فاصله کانونی را محاسبه کردیم. با رسم نمودار تغییرات قطر لکه در مرکز میله لیزر نقطه پایدار دینامیکی در نزدیکی فاصله ۴۰ سانتی‌متری بدست آمد که اگر فاصله کانونی به کم‌تر از ۲۰ سانتی‌متر برسد، تشدیدگر ناپایدار خواهد شد.

### نظری تشدیدگر تلسکوپی

با در نظر گرفتن تلسکوپ به‌عنوان دو عدسی با فاصله  $d+\delta$ ، ماتریس تلسکوپ را به صورت زیر می‌نویسیم. [1]

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d+\delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

با ضرب ماتریس‌های انتقال پرتو قطعات اپتیکی تشدیدگر، ماتریس یک رفت و برگشت کامل تشدیدگر حاصل می‌شود که به کمک مولفه‌های آن، طبق رابطه (۲) شرط پایداری بیان می‌شود [5]:

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (2)$$

### مقدمه

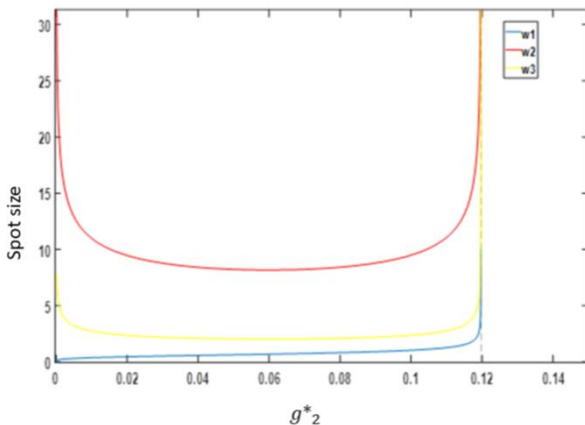
یکی از روش‌های پرکاربرد در طراحی تشدیدگر روش ماتریس ABCD است [۱]. در این روش ویژگی‌المان‌های اپتیکی به صورت ماتریس نشان داده می‌شود [2]. طراحی تشدیدگر به گونه‌ای انجام می‌شود که تاثیر تغییرات حرارتی فاصله کانونی میله لیزر را کاهش دهد [3]. در روش ABCD در تشدیدگر تلسکوپی با استفاده از تقریب لنز نازک برای عدسی‌ها [4] و با توجه به اثرات گرمایی ناخواسته محیط فعال [5] ماتریس انتقال تمام عناصر اپتیکی محاسبه شده و تشدیدگر تلسکوپی طراحی و تحلیل شده است و نتایج با تشدیدگر بدون تلسکوپ مقایسه شده است [6]. در سال ۱۹۶۹ برای اولین بار Krupke و Sooy مطالعاتی در رابطه با تشدیدگر تلسکوپی انجام دادند، در سال ۱۹۸۱ Hanna در رابطه با این تشدیدگر بیان کرد که این تشدیدگر به دلیل قابلیت تنظیم تلسکوپ، برای افزایش قطر لکه TEM<sub>00</sub> عملکرد خوبی دارد [۲]. در سال ۱۹۷۹ Sarkies انرژی خروجی تشدیدگر تلسکوپی را محاسبه کرده و با تشدیدگر بدون تلسکوپ مقایسه کرد و نشان داد می‌توان با تنظیم تلسکوپ میزان انرژی تشدیدگر را افزایش داد [۷].

ما در این مقاله با محاسبه حجم مد تشدیدگر تلسکوپی برحسب مقدار غیرکانونی تلسکوپ، افزایش حجم مد را در اثر حضور تلسکوپ در تشدیدگر نشان می‌دهیم.

### معرفی تشدیدگر تلسکوپی

از دلایل به‌کارگیری تلسکوپ در تشدیدگر می‌توان به دو ویژگی آن اشاره کرد: (۱) تنظیمات تلسکوپ این اجازه را به ما می‌دهد که به راحتی اثرات لنز حرارتی را کنترل کنیم. (۲) لکه روی میله لیزری را بزرگ کرده و در عین حال از تشکیل لکه خیلی کوچک بر آینه جلوگیری می‌کند که عملکرد خوب لیزر را بیان می‌کند. سیستم لیزری مورد

پایداری بدست آوردیم و شعاع باریکه  $\omega_1$  روی آینه اول، شعاع باریکه  $\omega_2$  روی آینه دوم و شعاع باریکه  $\omega_3$  روی عدسی شیء تلسکوپ را با ثابت در نظر گرفتن شعاع انحنای آینه اول و بزرگنمایی تلسکوپ به صورت شکل (۲) بر حسب میلی متر به دست آوردیم.



شکل ۲: رسم شعاع انحنای باریکه  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  بر حسب  $g_2^*$

### محاسبه حجم مد در تشدیدگر تلسکوپی

از پارامترهای تعیین کننده در توان خروجی تشدیدگر، حجمی از محیط فعال است که توسط مد TEM<sub>00</sub> پر می شود. در ابتدا به کمک رابطه (۵) شعاع باریکه  $\omega_2$  را به کمک مولفه های ماتریس بر حسب پارامترهای  $f_{th}$  و  $\delta$  و نوشته و سپس حجم مد را طبق رابطه (۶) بر حسب پارامترهای  $f_{th}$  و  $\delta$  به دست آوردیم [۵]، [۸]:

$$\omega^2 = \left(\frac{2\lambda B}{\pi}\right) / \sqrt{4 - (A + D)^2} \quad (5)$$

$$V_{00} = \iint_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{\frac{-2r^2}{d}} 2\pi r dr dz \quad (6)$$

بازه انتگرال روی محیط فعال گرفته می شود. برای تشدیدگر شکل (۱) در محیط فعال محل  $z=0$  را مشخص کرده و براساس این مکان، ماتریس های انتقال پرتو را بر حسب  $z$  می نویسیم [۱]. برای مقدار معین فاصله کانونی لنز حرارتی، انتگرال معادله (۶) بر حسب  $\delta$  حل می شود که

در تشدیدگرهای فعال شامل لنز حرارتی رابطه (۳) به صورت رابطه (۳) بیان می شود که  $g_1^*$  و  $g_2^*$  پارامترهای تعمیم یافته  $g_1$  و  $g_2$  هستند [6]:

$$0 < g_1^* g_2^* < 1 \quad (3)$$

Hanna به کمک دو پارامتر  $g_1^*$  و  $g_2^*$  محاسبات تئوری تشدیدگر را انجام داد. در تشدیدگر خطی شعاع باریکه  $\omega_2$  بر حسب  $g_1^*$  و  $g_2^*$  به صورت زیر است [5]، [6]:

$$\frac{\pi \omega_2^2}{\lambda} = L \left( \frac{g_1^*}{g_2^* (1 - g_1^* g_2^*)} \right)^2 \quad (4)$$

از معادله (۴) مشخص است که شعاع باریکه  $\omega_2$  به پارامتر  $g_1^*$  و  $g_2^*$  وابسته است. از رابطه (۴) تغییرات  $\frac{d\omega_2}{\omega_2}$  نسبت به  $\frac{dg_2^*}{g_2^*}$  را محاسبه کرده و استنباط شد که اگر حاصل ضرب  $g_1^* g_2^*$  برابر  $\frac{1}{2}$  شود، شعاع باریکه  $\omega_2$  نسبت به نوسانات  $g_2^*$  مستقل می شود.

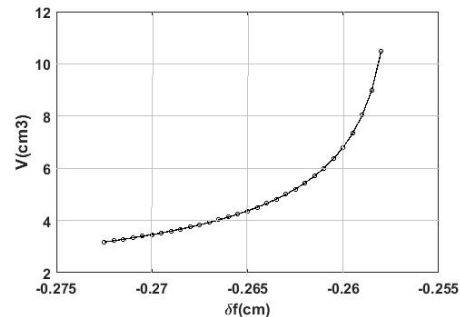
Hanna به کمک معادله (۴) منحنی شعاع انحنای باریکه  $\omega_2$  را در ناحیه پایداری رسم کرده و ناحیه ای که شعاع انحنای باریکه  $\omega_2$  حساسیت کمتری نسبت به پارامترهای تشدیدگر دارد را به دست آورد، نتایج نشان داد در ناحیه ای که  $g_1^* > 1$  است، شعاع باریکه  $\omega_2$  نسبت به تغییرات  $g_1^*$  و  $g_2^*$  حساسیت کمتری دارد [۶]. برای اینکه  $g_1^* > 1$  باشد لازم شد  $R_1$  منفی باشد، یعنی به کارگیری آینه محدب و از اینرو برای حفظ شرط  $\frac{1}{2} = g_1^* \times g_2^*$ ،  $g_2^*$  باید کوچک تر از یک، یعنی باید  $R_2$  مثبت و آینه مقعر باشد [۵] و [۶].

دو شرط اساسی که برای طراحی تشدیدگر تلسکوپی در این تحقیق بیان شد: (۱) بررسی شرط پایداری که نتیجه آن  $\frac{1}{2} = g_1^* \times g_2^*$  بود (۲)  $g_1^* > 1$  و  $g_2^* < 1$ . توسط کدنویسی در MATLAB مولفه های ماتریس انتقال پرتو را به دست آورده و شرایط مذکور را بر مؤلفه ها اعمال کردیم. شعاع انحنای آینه ها و فاصله قطعات اپتیکی از هم در تشدیدگر تلسکوپی را به کمک دو شرط بالا در ناحیه

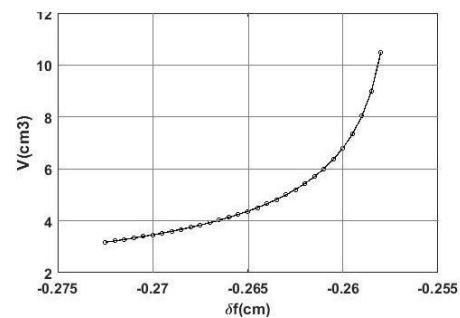
## مرجع‌ها

- [1] Verdeyen, J.T., *Laser electronics*. Laser electronics/2nd edition/, by JT Verdeyen, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, ۱۹۸۹, ۶۴۰p., ۱۹۸۹.
- [2] Hanna, D., C. Sawyers, and M. Yuratich, *Large volume TEM<sub>00</sub> mode operation of Nd: YAG lasers*. Optics Communications, ۱۹۸۱, ۳۷(۵): p. ۳۶۲-۳۵۹.
- [3] Iffländer, R., *Solid-state lasers for materials processing: fundamental relations and technical realizations*. Vol. ۷۷. ۲۰۱۲: Springer.
- [4] TAŞAL, E. and M.S. KILIÇKAYA, *Relations for Different Resonators of Nd: Glass and Nd: YAG Lasers*. Turkish Journal of Physics, ۲۰۰۲, ۲۶(۲): p. ۱۲۰-۱۰۹.
- [5] Koechner, W. and M. Bass, *Solid-State Lasers: A Graduate Text*. ۲۰۰۶: Springer Science & Business Media.pp.
- [6] Hanna, D., C. Sawyers, and M. Yuratich, *Telescopic resonators for large-volume TEM<sub>00</sub> mode operation*. Optical and Quantum Electronics, ۱۹۸۱, ۱۳(۶): p. ۵۰۷-۴۹۳.
- [7] Sarkies, P., A stable YAG resonator yielding a beam of very low divergence and high output energy. Optics Communications, ۱۹۷۹, ۳۱(۲): p. ۱۹۲-۱۸۹.
- [8] Hodgson, N. and H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts, Applications*. Vol. ۱۰۸. ۲۰۰۵: Springer

نتایج آن را برای فاصله کانونی با دو مقدار ۴۰۰ و ۴۵۰ سانتی‌متر در دو نمودار (۳) و (۴) آورده‌ایم.



شکل ۳: نمودار حجم مد بر حسب  $\delta$  برای فاصله کانونی لنز حرارتی ۴۰۰ سانتی‌متر



شکل ۴: نمودار حجم مد بر حسب  $\delta$  برای فاصله کانونی لنز حرارتی ۴۵۰ سانتی‌متر

## نتیجه‌گیری

طبق نمودارهای حجم مد بر حسب مقدار  $\delta$  که برای فاصله‌های کانونی متفاوت لنز حرارتی رسم شد، با افزایش فاصله کانونی لنز حرارتی و کاهش مقدار  $\delta$  می‌توان به بیشینه حجم مد رسید. در واقع رابطه بین فاصله کانونی لنز حرارتی و  $\delta$  به صورت تابع هموگرافیک است. طراحی ما به گونه‌ای بوده که به ازای ماکسیمم و مینیمم مقدار غیرکانونی تلسکوپ، پایداری تشدیدگر نیز حفظ شود.