



لیزر
مکانیکی و دوختنی
پژوهشی

بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



طراحی مشدد تاشو لیزرهای حالت جامد قفل شدگی مد غیرفعال دمش از انتهای

محمد جواد عشقی و عطا کوهیان

دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده - در این مقاله، شیوه ای نوین برای طراحی مشدد لیزرهای قفل شدگی مد غیرفعال دمش از انتهای ارائه می شود. هدف از این الگوریتم، ایجاد لکه هایی با اندازه‌ی مناسب روی آئینه‌ی جاذب اشباع پذیر و نیز محیط فعال لیزر به منظور دستیابی به حالت عملکردی قفل شدگی مد پیوسته به جای قفل شدگی مد کلید زنی شده می باشد. در پایان نتیجه‌ی الگوریتم ما برای لیزر قفل شدگی مد $Nd:YVO_4$ با نتایج حاصل از نرم افزار قدرتمند لیزری LASCAD مقایسه می شود که تطابق خوب نتایج، نشان از دقیقت الگوریتم ارائه شده می باشد.

کلید واژه- آئینه های جاذب، قفل شدگی مد غیرفعال، لیزرهای حالت جامد، مشدد تاشو.

Designing Folded Resonator Of End-Pumped Passively Mode Locked Solid State Lasers

Mohamad javad Eshghi and Ata Koohian

Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran

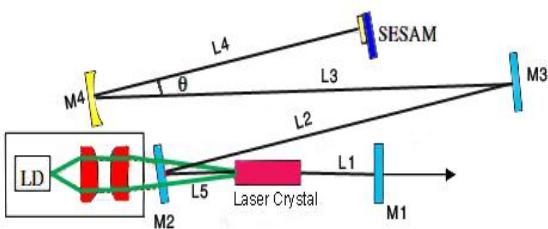
Abstract- In this paper, a novel method is presented for designing resonator of end-pumped passively mode locked solid state lasers. The aim of this paper is to design a stable resonator ensuring continuous wave mode locking operation of laser instead of the Q switched mode locking by producing suitable beam sizes on SESAMs and gain medium. Finally, the results of our modeling for a Nd:YVO₄ mode locked laser are examined by simulation of the same laser in laser software LASCAD to demonstrate accuracy of the method.

Keywords: folded cavity, solid state laser, saturable absorber mirror, passively mode locking

۱- مقدمه

لیزرهای قفل شدگی مد دمش از انتهای با قابلیت کیفیت بالای پرتو، توان های پیک بالا و پهنهای پالس کوتاه کاربردهای زیادی در حوزه های ماشین کاری، طیف سنجی پیشرفته و فاصله یاب های صنعتی پیدا کرده اند. علاوه بر آن این لیزرهای توانایی تولید هارمونیک های بالاتر با یکبار عبور از بلورهای غیرخطی را خواهند داشت که این مسئله ناشی از توان های پیک چند کیلوواتی آنها می باشد. امروزه در این لیزرهای توانایی جاذب اشعاع پذیر نیمه رسانا (SESAM) به عنوان قفل کننده مد استفاده می شود که برخلاف قفل کننده های مد فعال به هیچ مولد خارجی برای عملکرد نیاز ندارند.

مطابق با تئوری لیزرهای قفل شدگی مد غیرفعال [۱]، برای دستیابی به قفل شدگی مد پایا، شار انرژی فرودی روی آینه های جاذب باید چندین برابر شار اشعاع آنها باشد به گونه ای که انرژی پالس درون کاواک از انرژی آستانه قفل شدگی مد پیوسته بیشتر شود. به همین منظور قطر لکه روی SESAM باید به اندازه ای باشد که شار انرژی مورد نیاز را ایجاد کند. لذا اندازه ای لکه هایی که باید روی SESAM ایجاد شود در بازه ای ۵۰-۱۵۰ μm قرار دارند [۲].



شکل ۱: مشدد تاشو لیزر قفل شدگی مد $Nd:YVO_4$. آینه M_4 مکرر و آینه های M_1, M_2, M_3 آینه های تخت می باشند [۵].

برای شروع، با درنظر گرفتن تمامی پارامترها اعم از فضای آزاد، عدسی گرمایی و آینه های برای یک ماتریس رفت و برگشت خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = F_4 C_4 F_3 F_2 F_5 S F_1 F_1 S F_5 F_2 F_3 C_4 F_4 \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{F'} & 1 \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{به گونه ای که}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y}{2nf} & \frac{Y}{n} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{Y}{2nf} \end{bmatrix} \quad \text{ماتریس های فضای آزاد،}$$

آینه مکرر و عدسی گرمایی می باشد. f, Y, L_i و f' به ترتیب طول بازوی آنام، طول میله لیزر، فاصله کانونی آینه مکرر و فاصله کانونی عدسی گرمایی می باشد. آینه های

همچنین برای دستیابی به قفل شدگی مد پایا، تنها یک مد عرضی باید در کاواک وجود داشته باشد [۳]. در مشدهای دمش از انتهای، دستیابی به تک مد عرضی TEM00 با استفاده از همپوشانی مناسب بین مد پایه نوسانگر لیزر و پرتو دمش انجام می شود [۴]. لذا مشخص است که مهمترین مسئله در طراحی مشدد لیزرهای قفل شدگی مد غیرفعال، دستیابی به دو لکه با اندازه ای مطلوب می باشد. لکه ای که روی SESAM قرار دارد باید به اندازه ای باشد که بوسیله ای اشعاع مناسب SESAM از موقع نویزهای ناشی از حالت قفل شدگی مد کلیدزنی شده جلوگیری کند و اندازه ای لکه ای دیگر که روی سر محیط فعل لیزر قرار می گیرد باید برابر با اندازه لکه پرتو دمش باشد تا با یک همپوشانی مناسب بتوان به تک مد عرضی TEM00 دست پیدا کرد. در قسمت بعد نشان داده می شود که چگونه با طراحی مناسب طول بازوهای مشدد می توان به این هدف دست یافت.

با جای گذاری مقادیر عددی پارامترهای ثابت، اندازه L' را روی SESAM تنها تابعی از طول بازوها خواهد بود:

$$W_S = W_S(L_1, L', L_4) \quad (3)$$

$$L' = L_2 + L_3$$

همین روند برای اندازه L' که روی سر میله لیزر نیز تکرار می شود به گونه ای که یک ماتریس رفت و برگشت نوشته می شود سپس با جای گذاری مقادیر عددی پارامترهای ثابت، اندازه L' را روی میله لیزر نیز تنها پارامتری از طول بازوها خواهد بود:

$$W_R = W_R(L_1, L', L_4) \quad (4)$$

حال دوتابع W_R و W_S باید همزمان بهینه شوند به این معنا که باید بردار $V = [L_1, L', L_4]$ را بدست آوریم که به ازای آن W_R و W_S به مقادیر $440 \mu\text{m}$ و $56 \mu\text{m}$ نزدیک شوند. برای بهینه سازی از روش L_p وزن دار استفاده کنیم که در قسمت بعد توضیح داده می شود.

۳- بهینه سازی به روش L_p وزن دار

روش L_p وزن دار یکی از معمول ترین روش هایی است که برای بهینه سازی چند تابع به صورت همزمان مورد استفاده قرار می گیرد [7]. در این روش چند تابع مطابق رابطه (5) با هم ترکیب شده و فرآیند بهینه سازی روی تابع ترکیبی انجام می شود [8].

$$L_p = \left(\sum_{j=1}^k w_j \left(\frac{f_j(x_{ideal}) - f_j(x)}{f_j^{max}(x) - f_j^{min}(x)} \right)^p \right)^{1/p} \quad (5)$$

در رابطه (5)، j نمایانگر تعداد توابعی است که باید بهینه سازی شوند، w_j نیز یک مقدار غیرمنفی است که بر اساس اهمیت تابع توسط طراح به آنها اختصاص داده می شود و P هم نشان دهنده i انحراف توابع از مقدار ایده آل آنهاست [7]. همچنین f_j^{max} و f_j^{min} بیشینه و کمینه تابع f_j هستند که بواسیله طراح مشخص می شود.

برای کاواک مورد نظر ما، بیشینه W_s و W_R به ترتیب $300 \mu\text{m}$ و $60 \mu\text{m}$ و کمینه $50 \mu\text{m}$ و $700 \mu\text{m}$ می باشد.

M4 یک آئینه مقعر می باشد که مولد آستیگماتیسم درون کاواک می باشد. به منظور کاهش اثر آستیگماتیسم ناشی از آئینه مقعر، $\theta < 6^\circ$ انتخاب شده است.

مطابق با تئوری ماتریسی [6] اندازه L' را روی SESAM برابر خواهد بود با :

$$W_s = \frac{\lambda_0 B}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{A+D}{2} \right)^2}} \quad (2)$$

در کاواک نشان داده شده در شکل (1) طول میله لیزر، شعاع آئینه ها و L_5 ثابت هستند و تنها پارامتر قابل تغییر، طول بازوها می باشد. علاوه بر آن فاصله i کانونی عدسی گرمایی برای دمکش از انتهای رابطه i زیر محاسبه می شود:

$$f_{th} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th} \left(\frac{dn}{dT} \right)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right) \quad (3)$$

در رابطه i بالا K_c ضریب هدایت گرمایی، ω_p اندازه i لکه روی محیط فعال، P_{th} توان تبدیل شده به گرما در محیط فعال لیزر، dn/dT ضریب ترموموپتیک، α ضریب جذب و l هم طول محیط فعال می باشد. برای محیط فعال $Nd:YVO_4$ موجود در کاواک (1) داریم :

$$K_c = 0.051 \text{ W/K cm}, dn/dT = 3.0 \times 10^{-6}/\text{K},$$

$$\omega_p = 0.440 \text{ mm}, \alpha = 10 \text{ cm}^{-1}, \text{ and } l = 15 \text{ mm}$$

لذا برای دمکش ۱۱ وات، فاصله کانونی 300 mm بدست می آید. تمام پارامترهای ثابت سیستم در جدول (1) نشان داده شده اند.

parameter	Value	parameter	value
Y	15mm	Radius of M_2	inf
L_5	22mm	Radius of M_3	inf
f	300mm	Radius of M_4	300mm
Radius of M_1	inf	Radius of $M_5(\text{SESAM})$	inf

جدول ۱: پارامترهای ثابت سیستم

این نشان از دقیقیت الگوریتم ارائه شده برای دستیابی به طول بازوهای مناسب می‌باشد.

Element Type	Position On optical axis	w(z) (saggital)	w(z) (Tangential)
Back Mirror	0.0	59	51
Rod interface	1492.	481	470

جدول ۲: نتایج حاصل از شبیه سازی در نرم افزار LASCAD

حال بر اساس معادله (۵)،تابع L_p را مطابق زیر تشکیل می‌دهیم.

$$L_p = \left(\frac{W_1 \left| \frac{W_s(L_1, L', L_4) - 56}{60 - 50} \right|^p}{W_2 \left| \frac{W_R(L_1, L', L_4) - 0.44}{0.7 - 0.3} \right|^p} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

سپس برای شرایط $P=10$ و $W_1=W_2=0.5$ معادله (6) را توسط نرم افزار MATLAB بهینه کردیم و نتایج آن شامل طول بازوها در جدول زیر نشان داده شده است. در قسمت بعد دقیقیت الگوریتم توسعه نرم افزار LASCAD بررسی می‌شود.

W ₁	W ₂	P	L ₁ (mm)	L' (mm)	L ₄ (mm)
0.5	0.5	10	306	1340	172

جدول ۲: طول بازوهای حاصل از بهینه سازی تابع (۶)

۵- نتیجه‌گیری

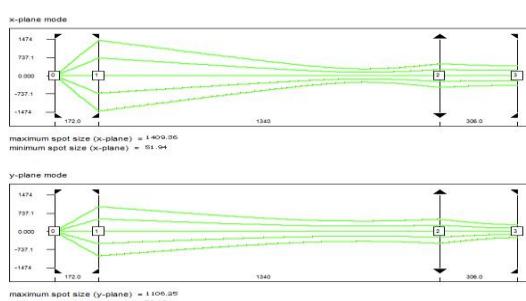
در این مقاله، شیوه‌ای جدید مبتنی بر تئوری ماتریسی ABCD برای طراحی مشدد لیزرهای قفل شدگی مد غیرفعال دمش از انتها ارائه شد که با ایجاد لکه هایی با اندازه‌های مناسب، عملکرد لیزر در حالت قفل شدگی مد پیوسته را تضمین می‌کند. در پایان دقیقیت این الگوریتم توسعه نرم افزار LASCAD بررسی شد.

مراجع

- [1] Keller U., Weingarten K.J., Kartner F.X., et al., Semiconductor Saturable Absorber Mirrors(SESAM's) for Femtosecond to Nanosecond Pulse Generation in Solid-State Lasers, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elect.*, 2, 435 (1996)..
- [2] Nikolov I., Popmintchev T., Buchvarov I., et al., *Cavity Design for Diode End-Pumped Passive Mode-Locked Solid State Laser*, *Proc. of SPIE*, 5226, 64 (2003).
- [3] Lin G., Wei H., Hong-bo Z., Yong-Gang W., et al., Diode-end-pumped passively mode-locked ceramic Nd:YAG Laser with a semiconductor saturable mirror, *Opt Express*, 13, 14805 (2005).
- [4] Koechner W. , *Solid State Laser Engineering*, p.148, Springer, New York 2006.
- [5] Peng R., Tang L., Guo L., Zhang X., Li F., et al., Picosecond laser oscillator with a cavity design for stable CW mode-locking operation , *Opt Laser Technol.*, 42, 1282 (2010).
- [6] Silfvast W., *Laser Fundamentals*, p. 430, Cambridge University Press, 2004.
- [7] Gaspar A., Covas J., *An Introduction To Multiobjective optimization techniques*, p.14, Nova Science Publishers, Mexico, 2011.
- [8] Noorossana R., Kamali M., *A weighted metric method to optimize multi-response robust problems*, *Journal of Industrial Engineering International*, 5, 10 (2009).

۴- شبیه سازی توسعه نرم افزار LASCAD

با استفاده از پارامترهای ثابت کواک که در جدول (۱) لیست شده اند و نیز طول بازویی که در قسمت قبل بدست آمده اند، کواک نشان داده شده در شکل (۱) را در نرم افزار LASCAD شبیه سازی کردیم که شماتیک آن در شکل (۲) نشان داده شده است. اندازه لکه هایی که نرم افزار برای این پیکربندی ارائه می‌دهد در جدول (۲) نشان داده شده اند.



شکل ۲: شماتیک کواک شبیه سازی شده در نرم افزار LASCAD

همانطور که مشخص است اندازه لکه روی آئینه عقبی (SESAM) و نیز روی سر میله لیزر بسیار نزدیک به مقادیر مورد نیاز طراح (۴۴۰ μm و ۵۶ μm) هستند که