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 انتها

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 انتها ارائه می شود. هدف از این الگوریتم، ایجاد لکه هایی با اندازه ی مناسب روی آئینه ی 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 نتیجه ی 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 دقت 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 $Nd:YVO_4$ 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

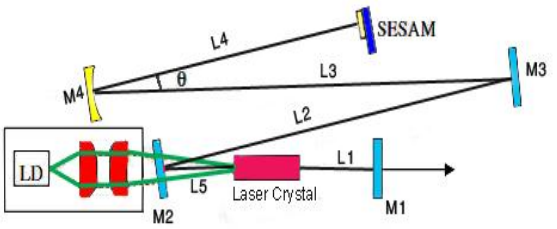
لیزرهای قفل شدگی مد دمش از انتها با قابلیت کیفیت بالای پرتو، توان های پیک بالا و پهنای پالس کوتاه کاربردهای زیادی در حوزه های ماشین کاری، طیف سنجی پیشرفته و فاصله یاب های صنعتی پیدا کرده اند. علاوه برآن این لیزرها، توانایی تولید هارمونیک های بالاتر با یکبار عبور از بلورهای غیرخطی را خواهند داشت که این مسئله ناشی از توان های پیک چندکیلوواتی آنها می باشد. امروزه در این لیزرها، از آئینه های جاذب اشباع 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 آئینه های جاذب باید چندین برابر شار اشباع 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 ی لکه هایی که باید روی SESAM ایجاد شود در بازه ی 50-150 μm قرار دارند[۲].

همچنین برای دستیابی به قفل شدگی مد پایا، تنها یک مد عرضی باید در کاواک وجود داشته باشد[۳]. در مشددهای دمش از انتها، 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 ی مطلوب می باشد. لکه ای که روی SESAM قرار دارد باید به اندازه ای باشد که بوسیله ی اشباع مناسب SESAM از وقوع نویزهای ناشی از حالت قفل شدگی مد کلیدزنی شده جلوگیری کند و اندازه ی لکه ی دیگر که روی سر محیط فعال 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.

۲- فرآیند طراحی

کاواک نشان داده شده در شکل (۱) را در نظر بگیرید. سامانه اپتیک دیود لیزرها می توانند پرتو دمش را در قالب مد گوسی TEM00 و با شعاع 440 μm روی سر میله لیزر کانونی کنند[5]. برای دستیابی به تک مد عرضی، شعاع مد گوسی نوسانگر هم باید حدود 440 μm باشد. همچنین آیئنه جاذب موجود در کاواک هم دارای شار انرژی اشباع $40\ \mu j/cm^2$ می باشد و طبق محاسبات انجام شده برای دستیابی به حالت عملکردی قفل شدگی مد پیوسته و با توجه به مشخصات محیط فعال و جاذب اشباع پذیر، اندازه لکه روی SESAM نیز باید حدود 56 μm انتخاب شود[5]. لذا طول بازوهای مشدد باید به گونه ای طراحی شوند که بتوان به این دو لکه دست پیدا کرد.



شکل ۱: مشدد تاشو لیزر قفل شدگی مد $Nd:YVO_4$. M_4 آئینه ی مقعر و M1, M2 وM3 آئینه های تخت می باشند[5].

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

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = F_4C_4F_3F_2F_5SF_1F_1SF_5F_2F_3C_4F_4 \qquad (۱)$$

به گونه ای که $F_i = \begin{bmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$، $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{F'} & 1 \end{bmatrix}$ و $S = \begin{bmatrix} 1+\frac{Y}{2nf} & \frac{Y}{n} \\ -\frac{1}{f} & 1-\frac{Y}{2nf} \end{bmatrix}$ ماتریس های فضای آزاد، آیئنه مقعر و عدسی گرمایی می باشد.$F^{'}$،Y،L_i و f به ترتیب طول بازوی iام، طول میله لیزر، فاصله کانونی آئینه مقعر و فاصله کانونی عدسی گرمایی می باشد. آئینه ی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

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

مطابق با تئوری ماتریسی [۶] اندازه لکه روی SESAM برابر خواهد بود با :

$$W_s = \frac{\lambda_0 B}{\pi\sqrt{1-\left(\frac{A+D}{2}\right)^2}} \qquad (۲)$$

در کاواک نشان داده شده در شکل (۱) طول میله لیزر، شعاع آئینه ها و L_5 ثابت هستند و تنها پارامتر قابل تغییر، طول بازوها می باشد. علاوه بر آن فاصله ی کانونی عدسی گرمایی برای دمش از انتها از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$f_{th} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{th}\left(dn/dT\right)}\left(\frac{1}{1-\exp(-\alpha l)}\right) \qquad (۳)$$

در رابطه ی بالا K_c ضریب هدایت گرمایی، ω_p اندازه ی لکه روی محیط فعال، P_{th} توان تبدیل شده به گرما در محیط فعال لیزر، dn/dT ضریب ترمواپتیک، α ضریب جذب و l هم طول محیط فعال می باشد. برای محیط فعال $Nd:YVO_4$ موجود درکاواک (۱) داریم :

$K_c = 0.051$ W/K cm, $dn/dT = 3.0\times10^{-6}$/K,

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

لذا برای دمش ۱۱ وات، فاصله کانونی 300 mm بدست می آید.تمام پارامترهای ثابت سیستم در جدول (۱) 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(SESAM)	inf

جدول ۱: پارامترهای ثابت سیستم

با جای گذاری مقادیر عددی پارامترهای ثابت، اندازه ی لکه روی SESAM تنها تابعی از طول بازوها خواهد بود:

$$W_S = W_S\left(L_1, L', L_4\right) \qquad (3)$$

به گونه ای که $L' = L_2 + L_3$

همین روند برای اندازه لکه 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 لکه روی میله لیزر نیز تنها پارامتری از طول بازوها خواهد بود:

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

حال دو تابع 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_S و W_R به مقادیر ۵۶ µm و ۴۴۰ µm نزدیک شوند. برای بهینه سازی از روش Lp وزن دار استفاده می کنیم که در قسمت بعد توضیح داده می شود.

۳- بهینه سازی به روش Lp وزن دار

روش Lp 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].

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

در رابطه (5)، j نمایانگر تعداد توابعی است که باید بهینه سازی شوند، w_j نیز یک مقدار غیرمنفی است که بر اساس اهمیت توابع توسط طراح به آنها اختصاص داده می شود و P هم نشان دهنده ی انحراف توابع از مقدار ایده آل آنهاست[۷]. همچنین f_j^{max} و f_j^{min} بیشینه و کمینه تابع f_j هستند که بوسیله طراح مشخص می شود.

برای کاواک مورد نظر ما، بیشینه W_s و W_R به ترتیب ۶۰µm و ۷۰۰ µm و کمینه ی آنها ۵۰ µm و ۳۰۰ µm می باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

حال بر اساس معادله (5) ، تابع L_p را مطابق زیر تشکیل می دهیم.

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

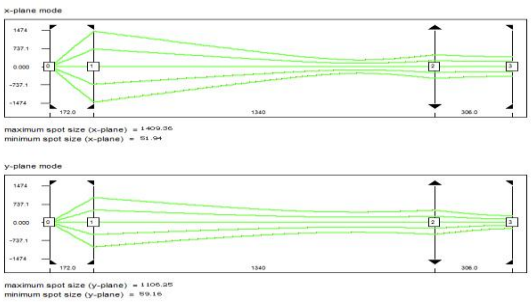
سپس برای شرایط $W_1=W_2=0.5$ و $P=10$ معادله ی (6) را توسط نرم افزار MATLAB بهینه کردیم و نتایج آن شامل طول بازوها در جدول زیر نشان داده شده است. در قسمت بعد دقت این الگوریتم توسط نرم افزار LASCAD بررسی می شود.

W_1	W_2	P	L_1 (mm)	L' (mm)	L_4(mm)
0.5	0.5	10	306	1340	172

جدول 2: طول بازوهای حاصل از بهینه سازی تابع (۶)

۴- شبیه سازی توسط نرم افزار LASCAD

با استفاده از پارامترهای ثابت کاواک که در جدول (۱) لیست شده اند و نیز طول بازوهایی که در قسمت قبل بدست آمده اند، کاواک نشان داده شده در شکل (۱) را در نرم افزار LASCAD شبیه سازی کردیم که شماتیک آن در شکل (2) نشان داده شده است. اندازه لکه هایی که نرم افزار برای این پیکربندی ارائه می دهد در جدول (2) نشان داده شده اند.



شکل ۲: شماتیک کاواک 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 (۵۶ µm و۴۴۰ µm) هستند که این نشان از دقت الگوریتم ارائه شده برای دستیابی به طول بازوهای مناسب می باشد.

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

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، شیوه ای 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 اندازه های مناسب، عملکرد لیزر در حالت قفل شدگی مد پیوسته را تضمین می کند. در پایان دقت این الگوریتم توسط 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).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]