بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی بازآواگر لیزر Nd:YAG قفل بندی شده مدی به روش آکوستواپتیکی و اصلاح ابیراهی آستیگماتیسم

زهرا موسی زاده فتیدهی، مهدی دهقان باغی و محمود سلطان الکتابی

[۱]گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این پژوهش بازآواگر لیزر قفل‌بندی شده *Nd:YAG* طراحی شده است. از روش آکوستواپتیکی برای قفل‌بندی مدی استفاده شده است در این طراحی اثرات آستیگماتیسم معرفی شده است و سپس با طراحی‌های لازم سعی در از بین بردن آن داریم. با توجه به این که طول رزوناتور از قبل تعیین شده است، با تغییر فواصل بین عناصر و تغییر زاویه خم آینه‌ها آستیگماتیسم اصلاح شده است.

کلید واژه- قفل بندی‌مدی کنا، آستیگماتیسم، اثر اتالون.

Design of acousto optic mode locked Nd:YAG resonator and astigmatism aberration correction

Zahra Musazadeh Fatidehi, Mahdi Dehghan Baghi and Mahmood Soltanolkottabi

Physics Department, Isfahan University, Isfahan

Abstract- In this investigation, Nd:YAG mode locked resonator has been designed. We have used acousto optics method to mode lock this laser and the astigmatism has been introduced. Considering that the resonator length is specified, we have reduced the effect of astigmatism by changing the optical elements distance and using tilting mirrors.

Keywords: active mode locking, astigmatism, etalon effect.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

لیزر قفل‌بندی شده مدی به روش کنای آکوستواپتیک (AO) دارای کاربردهای وسیعی می‌باشد. در طراحی بازآواگر این دسته لیزرها طول بازآواگر، فرکانس کاری mode locker و اثر اتالون[1] باید به دقت کنترل شود تا خروجی با پهنای پالس کوتاه و پایدار داشته باشیم[۱]. طول معمول این بازآواگرها زیاد است و برای کوچک بودن سیستم آن را به صورت Z شکل طراحی می‌کنیم. این خود باعث ایجاد اثر آستیگماتیسم در بازآواگر شده و نمایه پرتو را بهم می‌ریزد[۲]. در این پژوهش یک بازآواگر Z شکل با بلور AO برش داده شده در زاویه بروستر طراحی شده و اثرات آستیگماتیسم درون آن اصلاح شده است.

۲- قفل‌بندی مدی کنا با استفاده از مدوله‌ساز آکوستواپتیک

قفل‌بندی مدی کنا از طریق مدوله‌سازی فاز و یا دامنه و به کمک مدوله‌ساز الکترواپتیک و یا آکوستواپتیک به‌دست می‌آید[۱]. اگر زاویه فرود پرتوی نوری بر مدوله‌ساز آکوستواپتیک برابر زاویه براگ باشد، $\sin\theta_B = \frac{\lambda_0}{2n\Lambda}$ ، پراش تک مرتبه‌ای براگ داریم که به دلیل بازدهی بالا در کاربردهای عملی معمولا از این رژیم، استفاده می‌کنند. در این رابطه λ_0 طول‌موج پرتوی نوری و Λ طول‌موج صوت است. میدان الکتریکی برای مرتبه‌های مختلف پراش از طریق حل معادلات رامان-نث[2] به دست می‌آید[۳].

$$\frac{dE_m}{dz} + \frac{u_1}{2L}\left(E_{m+1} - E_{m-1}\right) = j\,\frac{mK_a}{\cos\theta_0}\left[\frac{mK_a}{2k_i} - \sin\theta_0\right]E_m \qquad (۱)$$

برای رژیم براگ میدان الکتریکی پراش مرتبه صفر و یک به صورت زیر در می‌آید[۴]:

$$E_1(z) = e^{-jqz/L}\left[\frac{u_1/2}{\sqrt{q^2+(u_1/2)^2}}\right]\sin\left[\frac{z}{L}\sqrt{q^2+(u_1/2)^2}\right] \qquad (۲)$$

$$E_0(z) = e^{-jqz/L}\left[\cos\left(\frac{z}{L}\sqrt{q^2+(u_1/2)^2}\right)\right] + j\,\frac{q}{\sqrt{q^2+(u_1/2)^2}}\sin\left[\frac{z}{L}\sqrt{q^2+(u_1/2)^2}\right] \qquad (۳)$$

تابع شدت عبور به‌صورت $E_0(L)E_0(L)^*$ و شدت پراش به‌صورت $1-E_0(L)E_0(L)^*$ نوشته می‌شود. L طول برهم‌کنش AO یا همان ضخامت بلور آکوستواپتیک می‌باشد. شدت پراش بهنجار یا بیشینه بازده پراش برای رژیم براگ به صورت زیر است :

$$I_{dm} = \sin^2\left[\frac{u_1}{2}\right] \qquad (۴)$$

$u_1 = -k_0\Delta nL/\cos\theta_0$ و Δn تغییرات ضریب شکست در بلورAO در اثر موج صوتی است. رابطه (۴) برحسب پارامترهای کاربردی به صورت زیر در می آید[۴]:

$$I_{dm} = \sin^2\left\{\frac{2\pi}{\lambda_0\cos\theta_0}M_2^{1/2}\left(\frac{P_aL}{2H}\right)^{1/2}\right\} \qquad (۵)$$

M_2عدد شایستگی ماده AO و P_a توان صوت و H ارتفاع موج‌صوتی یا همان اندازه روزنه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود بازده‌پراش به قطر پرتو حساس می‌شود. در طراحی بازآواگر باید به این نکته توجه داشته باشیم که پرتویی که به مدوله‌ساز AO می‌رسد موازی باشد.

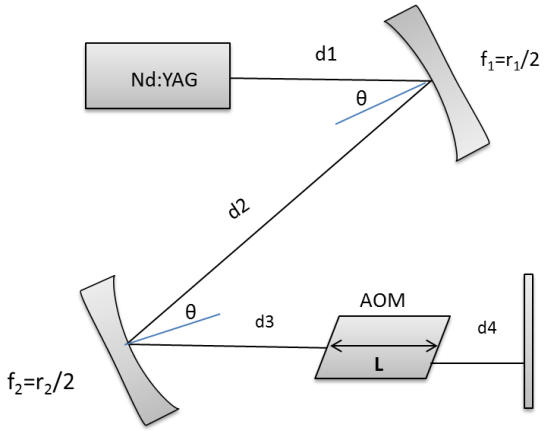
۳- طراحی باز آواگر برای قفل‌بندی مدی آکوستواپتیکی

قفل‌بندی مدی کنا به تنظیمات طول بازآواگر بسیار حساس است و برای اینکه قفل‌بندی مدی دقیق به‌دست آید باید طول بازآواگر متناسب با فرکانس صوت تنظیم شود. فرکانس مدوله‌سازی دو برابر فرکانس RF است و منطبق بر فاصله مدهای طولی مجاور در بازآواگر، $f_m = c/2L$ ، می‌باشد. در این پژوهش فرکانس تشدید مدوله‌ساز AO (که از ماده SiO_2 تشکیل شده است) برابر 80 MHz است. درنتیجه نرخ تکرار تپ یا همان فرکانس مدوله‌سازی برابر 160MHz می‌شود که متناظر با طول بازآواگر 93.75cm است. مؤلفه‌های اپتیکی مسطح با دو وجه موازی باعث تشکیل اثر اتالون می‌شود. بازتاب از سطح این عناصر منجر به تداخل ویرانگر پرتوی نوری و حذف برخی از تابش‌ها می‌شود. اتالون پهنای باند موثر بهره را محدود کرده و گستره زمانی تپ قفل‌شده مدی را افزایش می‌دهد[۵]. برای از بین بردن این اثر، بلور AOM که در زاویه بروستر برش داده شده انتخاب می‌کنیم. از طرفی برش در زاویه بروستر منجر به آستیگماتیسم در پرتوی خروجی می‌شود. از این‌رو قطر پرتو در دو راستای x وy متفاوت بوده و سطح مقطع پرتو دایره‌ای نیست. برای برطرف کردن آستیگماتیسم از آینه‌های تاکننده[3]

[1] etalon effect
[2] Raman-Nath equations
[3] folding mirror

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

استفاده می‌کنیم. به همین دلیل بازآواگر لیزری را به صورت z شکل طراحی کردیم. برای بهینه‌سازی طراحی بازآواگر این نکات را در نظر می‌گیریم: ۱-پایداری بازآوگر در هردو راستای x وy برقرار باشد.۲- بازآواگر باید حجم مدی بالایی تولید کند.۳- قفل‌کننده مد AO در شاخه‌ای قرار بگیرد که پرتوهای موازی به آن می‌رسند. ۴- آستیگماتیسم ناشی از آینه‌های تاکننده و المان برش داده شده در زاویه بروستر باهم جبران شود. ۵- قطر پرتو در راستای x وy تقریبا با هم برابر شده و سطح مقطع پرتو دایره‌ای باشد.



شکل ۱- بازآواگر z شکل برای لیزر قفل‌شده مدی آکوستواپتیکی

طول بلور لیزر 6.5mm و قطر آن 3mm است. فاصله کانونی آینه‌های تاکننده را ثابت و برابر با $f_1=350cm$ و $f_2=200cm$ و فاصله‌کانونی عدسی گرمایی را $f_{th}=150cm$ در نظر می‌گیریم. بلور لیزر از پهلو دمش می‌شود و توان پرتوی دمش 90W است و بنابراین فاصله‌کانونی عدسی گرمایی ایجاد شده در Nd:YAG توجه به رابطه (۶) حدود 1.5m می شود[۶].

$$F_{th}=\frac{KA_g}{\eta P_{in}}\left(\frac{1}{2}\frac{dn}{dT}+\alpha C_{r,\varphi}n_0^3+\frac{\alpha r_0(n_0-1)}{L}\right)^{-1} \qquad (۶)$$

در رابطه(۶)، A_g سطح مقطع میله لیزری و ηP_{in} مقدار گرمای اتلافی کل در میله لیزری است.

۴- آستیگماتیسم و جبران آن

زاویه قرار گرفتن آینه‌های تاکننده را طوری تنظیم می‌کنیم که آستیگماتیسم ناشی از المان برش داده شده در زاویه بروستر را جبران کند. از طرفی پرتویی که بر آینه تاکننده در زاویه θ فرود می‌آید، فاصله کانونی آن را در صفحات x و y تغییر می‌دهد($f_x=f/\cos\theta$ و $f_y=f.\cos\theta$). ماتریس انتقال برای بلور AOM که از هر دو طرف در زاویه بروستر برش داده شده، به شکل ماتریس 4×4 زیر است[۷] .

$$M_{BrewsterSlab}=\begin{pmatrix}1&0&L\,n_1/n_2&0\\0&1&0&L\,(n_1/n_2)^3\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix} \qquad (۷)$$

رابطه (۷) را می‌توان به صورت جداگانه برای راستای x و y نوشت.

برای جبران آستیگماتیسم باید زاویه فرود پرتوی لیزر با آینه‌های تاکننده طوری تنظیم شود که اختلاف در طول مسیر موثر المان بروستر با اختلاف بین فاصله‌های کانونی آینه‌های تاکننده درصفحات x و y جبران شود [۸]:

$$f=\frac{t\left(n^2-1\right)\sqrt{n^2+1}}{\sin\theta\tan\theta n^4} \qquad (۸)$$

با توجه به آینه‌های با فاصله کانونی ثابت فوق الذکر، و با استفاده از رابطه (۸) برای بلور AOM که ضخامت آن t=17mm است، زاویه $\theta=3.5^o$ را به دست می‌آوریم. از طریق برنامه‌ای که توسط نرم‌افزار MATLAB نوشتیم، قطر پرتو برای نقاط مختلف بازآواگر را به‌دست می آوریم. اختلاف بین قطر پرتو روی آینه f_2 و قطر آن روی بلور AOM با Δw نشان داده می‌شود که هرچه این اختلاف کمتر باشد پرتو به صورت موازی‌تر به AOM می‌رسد.

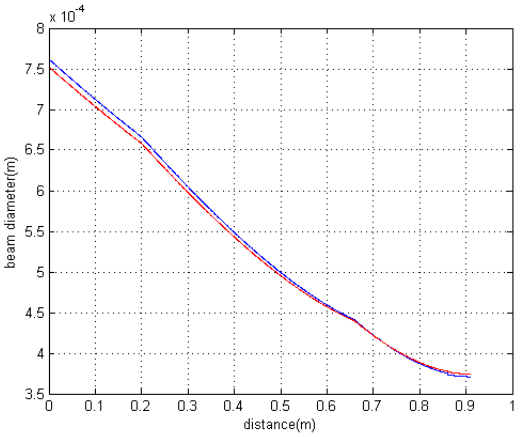
جدول ۱- تغییر فاصله‌ها با ثابت نگ داشتن شعاع آینه‌های تاکننده

d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	d_4 (cm)	w_x (mm)	w_y (mm)	Δw
20	30	25	16	0.77	0.78	0.53-0.37
20	37	30	4	0.71	0.72	0.49-0.36
20	46	20	5	0.75	0.76	0.43-0.38
25	31	30	5	0.78	0.79	0.49-0.37
25	40	20	6	0.73	0.73	0.62-0.45
25	20	30	16	0.89	0.91	0.60-0.35
25	30	20	16	0.80	0.80	0.50-0.37
30	40	11	10	0.60	0.61	0.47-0.43
30	34	20	07	0.67	0.67	0.50-0.46

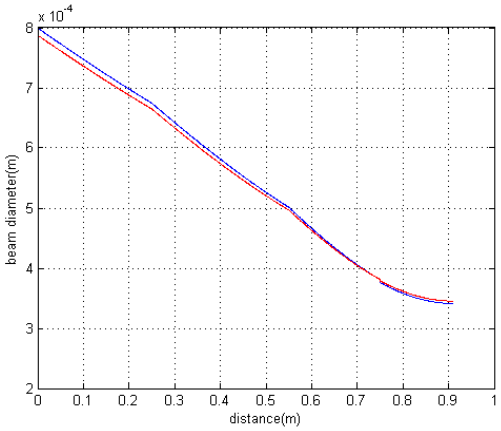
در شکل ۲ و ۳ نمودار تغییر قطر در بازآواگر را به‌ترتیب برای دو ردیف ۳ و ۷ جدول ۱ مشاهده می‌کنیم. پایداری بازآواگر برقرار است و پرتو در شاخه ای که AOM وجود دارد تقریبا موازی بوده و سطح مقطع آن دایره‌ای است. بنابراین قطر پرتو در راستای x و y برابر می شود. از

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

مقایسه دو شکل ۲ و ۳ به این نتیجه می‌رسیم که هرچه AOM به آینه انتهای بازآواگر نزدیک‌تر باشد در موازی شدن پرتوی رسیده به AOM کمک می‌کند.



شکل ۱- نمودار تغییر قطر پرتو برای فواصل مختلف طول بازآواگر ردیف ۳ جدول ۱.



شکل ۲- نمودار تغییر قطر پرتو برای فواصل مختلف طول بازآواگر ردیف ۷ جدول ۱.

از طرفی در جدول ۲ با ثابت نگه‌داشتن فواصل ($d_1 = 25, d_2 = 40, d_3 = 20, d_4 = 6$) و تغییر دادن فاصله کانونی آینه‌های تاکننده و زاویه خم آن‌ها، موازی شدن پرتو را روی AOM بررسی می‌کنیم.

جدول ۲- تغییر شعاع آینه های تاکننده،ثابت نگه داشتن فواصل بین المان ها

$f_1(m)$	$f_2(m)$	θ	$w_{x,y}(mm)$	Δw
3	1	4.9	0.68	0.43-0.35
3	1.5	4	0.75	0.44-0.36
3.5	2	3.5	0.74	0.45-0.38
2	2.5	3.1	0.9	0.41-0.30
3	2.5	3.1	0.77	0.43-0.37
3.5	3	2.9	0.76	0.44-0.39

از مقایسه داده‌های جدول (۲) به این نتیجه می‌رسیم که تغییر فاصله‌های کانونی آینه‌های تاکننده تاثیر زیادی روی موازی شدن پرتوی رسیده به AOM ندارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی بازآواگر z شکل طراحی شده برای قفل‌بندی مدی آکوستواپتیکی پرداختیم و با استفاده از آینه‌های تاکننده آستیگماتیسم ناشی از بلور آکوستواپتیک برش داده شده در زاویه بروستر، را جبران کردیم. سرانجام به این نتیجه رسیدیم که هرچه مدوله‌ساز AOM به آینه ی انتهای بازآواگر نزدیک‌تر باشد در موازی شدن پرتوی رسیده به AOM کمک می‌کند.

مراجع

[1] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (springer, 2006).

[2] H. W. Kogelink, E. P. Ippen, A. Dienes, and C. V. Shank, *Astigmatically Compensated Cavities for CW Dye Lasers*, **IEEE Jornal of Quantom Electronics** QE-8 (1972).

[3] C. V. Raman, and N. S. N. Nath, *The diffraction of light by high frequency sound waves Parts 3-5*, **Proc. Indian Acad. Sci**. **A3**, 75-84, 119-126, 459-465 (1936).

[4] A. P. Goutzoulis, and D. R. Pape, *design and fabrication of acousto-optic devices* (1994).

[5] i. O. Musgrave, *study of the Physics of the Power-Scaling of End-Pumped Solid-State Laser Sources Based on Nd:YVO₄*, (University Of Southampton, 2003).

[6] W. Koechner, *Thermal Lensing in a Nd:YAG Laser Rod*, **APPLIED OPTICS** 9 (1970).

[7] N. Hodgson, and H. Weber, *Laser Resonators and Beam Propagation* (Springer, 2005).

[8] I. N. Duling, *Compact Sources of Ultrashort Pulses* (**Cambridge Studies in Modern Optics**, 2006).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]