





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

زهرا موسى زاده فتيدهى، مهدى دهقان باغى و محمود سلطان الكتابي

^۱گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این پژوهش باز آواگر 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.

كليد واژه- قفل بندىمدى كنا، آستيگماتيسم، 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.

۱– مقدمه

لیزر قفلبندی شده مدی به روش کنای آکوستواپتیک (AO) دارای کاربردهای وسیعی میباشد. در طراحی (AO) بازآواگر این دسته لیزرها طول بازآواگر، فرکانس کاری mode locker و اثر اتالون^۱ 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 طول معمول این بازآواگرها زیاد است و برای کوچک بودن خود باعث ایجاد اثر آستیگماتیسم در بازآواگر شده و نمایه پرتو را بهم میریزد[۲]. در این پژوهش یک بازآواگر Z پرتو را بهم میریزد[۲]. در این پژوهش یک بازآواگر تمده و شکل با بلور کارت کاری شده و نمایه شده و اثرات آستیگماتیسم درون آن اصلاح شده است.

۲- قفلبندی مدی کنا با استفاده از مدولهساز آکوستواپتیک

قفلبندی مدی کنا از طریق مدوله سازی فاز و یا دامنه و به کمک مدوله ساز الکترواپتیک و یا آکوستواپتیک به دست میآید [1]. اگر زاویه فرود پرتوی نوری بر مدوله ساز آکوستواپتیک برابر زاویه براگ باشد، $\frac{\lambda_0}{2n\Lambda} = \frac{\delta_0}{2n\Lambda}$ ، پراش تک مرتبه ای براگ داریم که به دلیل بازدهی بالا در کاربردهای عملی معمولا از این رژیم، استفاده می کنند. در این رابطه λ_0 طول موج پرتوی نوری و Λ طول موج صوت است. میدان الکتریکی برای مرتبه های مختلف پراش از طریق حل معادلات رامان-نث⁷ به دست میآید [۳].

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

yelds the set of the s

برای رویه برا به میآید[۴]: به صورت زیر در میآید[۴]:

 $E_{1}(z) = e^{-jqz/L} \left[\frac{u_{1}/2}{\sqrt{q^{2} + (u_{1}/2)^{2}}} \right] \sin \left[\frac{z}{L} \sqrt{q^{2} + (u_{1}/2)^{2}} \right]$ (Y)

$$E_{0}(z) = e^{-jqz/L} \left[\cos\left(\frac{z}{L}\sqrt{q^{2} + (u_{1}/2)^{2}}\right) \right]$$

$$+ j \frac{q}{\sqrt{q^{2} + (u_{1}/2)^{2}}} \sin\left[\frac{z}{L}\sqrt{q^{2} + (u_{1}/2)^{2}}\right]$$
(°)

تابع شدت عبور بهصورت ${}^{*}E_{0}(L)E_{0}(L)$ و شدت پراش بهصورت ${}^{*}L_{0}(L)E_{0}(L)$ نوشته میشود. L طول برهمکنش AO یا همان ضخامت بلور آکوستواپتیک می-

¹etalon effect

 $I_{dm} = \sin^2 \left[\frac{u_1}{2} \right] \tag{f}$

و Δn و $u_1 = -k_0 \Delta n L/\cos \theta_0$ و $u_1 = -k_0 \Delta n L/\cos \theta_0$ در بلور AO در اثر موج صوتی است. رابطه (۴) برحسب پارامترهای کاربردی به صورت زیر در می آید[۴]:

$$I_{dm} = \sin^2 \left\{ \frac{2\pi}{\lambda_0 \cos \theta_0} M_2^{1/2} \left(\frac{P_a L}{2H} \right)^{\eta^2} \right\}$$
 (2)

 M_2 عدد شایستگی ماده AO و P_a و H توان صوت و H ارتفاع موجصوتی یا همان اندازه روزنه میباشد. همانطور که مشاهده میشود بازدهپراش به قطر پرتو حساس می-شود. 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

قفل بندی مدی کنا به تنظیمات طول باز آواگر بسیار حساس است و برای اینکه قفل بندی 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، ، مىباشد. در اين پژوهش فركانس تشديد $f_m = c/2L$ مدولهساز AO (که از ماده SiO₂ تشکیل شده است) برابر 80 MHz است. درنتيجه نرخ تكرار تپ يا همان فركانس مدولهسازی برابر 160MHz می شود که متناظر با طول بازآواگر 93.75cm است. مؤلفههای ایتیکی مسطح با دو وجه موازی باعث تشکیل اثر اتالون می شود. بازتاب از سطح این عناصر منجر به تداخل ویرانگر پرتوی نوری و حذف برخی از تابشها می شود. اتالون پهنای باند موثر بهره را محدود کرده و گستره زمانی تپ قفل شده 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 می شود. از این رو قطر پرتو در دو راستای x وy متفاوت بوده و سطح مقطع پرتو دایرهای نیست. برای برطرف کردن آستیگماتیسم از آینههای تاکننده^۳

³ folding mirror

² Raman-Nath equations

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.



طول بلور لیزر 3mm و قطر آن 3mm است. فاصله $f_I=350cm$ و $f_I=350cm$ و $f_h=150cm$ و $f_{th}=150cm$ و $f_{th}=150cm$ و فاصله کانونی عدسی گرمایی را $f_{th}=150cm$ در نظر می گیریم. بلور لیزر از پهلو دمش می شود و توان پرتوی دمش W1 است و بنابراین فاصله کانونی عدسی گرمایی ایجاد شده در Nd:YAG توجه به رابطه (۶) حدود 1.5m

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

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 می-کنیم 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

و $f_x = f/\cos\theta$ میدهد $f_x = f/\cos\theta$ و که از AOM که از $f_v = f . \cos \theta$ هر دو طرف در زاویه بروستر برش داده شده، به شکل ماتریس 4×4 زیر است[۷] . $(1 \ 0 \ L n_1/n_2)$ 0 (Y) $L(n_1/n_2)^3$ 0 1 0 $M_{BrewsterSlab} =$ 0 0 0 0 0 1 0

رابطه (۷) را می توان 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]: $t(n^2 - 1)\sqrt{n^2 + 1}$

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

با توجه به آینههای با فاصله کانونی ثابت فوق الذکر، و با استفاده از رابطه (۸) برای بلور AOM که ضخامت آن استفاده از رابطه (۸) برای بلور MATL که ضخامت آن 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 می شود که هرچه این اختلاف کمتر باشد پرتو به صورت موازیتر به AOM می سد. جدول ۱- تغییر فاصلهها با ثابت نگ داشتن شعاع آینههای تاکننده

1							
	d_1	d_2	d_3	d_4	W _x	w _y	Δw
	(<i>cm</i>)	(<i>cm</i>)	(<i>cm</i>)	(<i>cm</i>)	(<i>mm</i>)	(<i>mm</i>)	
	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 می کنیم. 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

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 طـول بـازآواگر ردیـف ۳ جدول ۱.



شکل ۲- نمودار تغییر قطر پرتو برای فواصل مختلف طـول بـازآواگر ردیـف ۷ جدول ۱.

از طرفی در جدول ۲ با ثابت نگەداشتن 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 قفل بندی مدی آکوستواپتیکی پرداختیم و با استفاده از آینه های تاکننده آستیگماتیسم ناشی از بلور آکوستواپتیک برش داده شده در زاویه بروستر، را جبران کردیم. سرانجام به این نتیجه رسیدیم که هرچه مدوله ساز AOM به آینه ی انتهای بازآواگر نزدیک تر باشد در موازی شدن پرتوی رسیده به AOM کمک می کند.

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).