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

طراحی و ساخت تشدیدگر U- شکل برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG

محمد آقایی، مجتبی مصلحیان، مهدی رجایی جعفرآبادی، علی مدیری و حسین بازیار

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده – در این مقاله طراحی و ساخت لیزر *Nd:YAG* دمش دیودی جانبی *Q* – سوئیچ شده با دو برابر شدگی فرکانسی درون کاواکی با تشدیدگر *U*–شکل در توان و پایداری بالا گزارش شده است. بطور گرافیکی پایداری تشدیدگر بر حسب پارامترهای طول تشدیدگر و دمش بررسی شده و تشدیدگر بهینه طراحی شده است. با استفاده از بلورهای غیر خطی *KTP* و *LBO* توان لیزر سبز به ترتیب ۱۴۲وات و ۱۱۱ وات در نرخ تکرار ۱۰*KHz* با پهنای تپ به ترتیب ۱۲۷*ns* و ۱۰۰*ns* بدست آمده است. بازده تبدیل نوری برای بلورهای *KTP* و *LBO* در این طراحی به ترتیب ٪۸۱/۶ و ٪۶۳/۸ بدست آمد.

کلید واژه- تولید هماهنگ دوم، لیزر Nd:YAG، لیزر دمش جانبی، رزوناتور U-شکل.

U-Type resonator design and fabricate for second harmonic generation of Nd-YAG laser

Mohammad Aghaie , Mojtaba Moslehian, Mahdi Rajaei Jafarabadi, Ali Modiri and Hossein Bazyar

Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran

Abstract- In this paper, A U-type resonator design and fabrication for intra-cavity frequency doubling of a diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser with high power and high stability power. The resonator stability conditions were analyzed graphically for various resonator length and pump powers for U-type resonator. We obtained green light at 532 nm using a single KTP crystal with average output power of 142W and 127ns pulse duration at 10kHz repetition rate. Also by replacing single LBO crystal with KTP, average output power of 111W with 100ns pulse duration at 10 kHz repetition rate is achieved. Optical-optical efficiency for KTP and LBO crystal was 81.6% and 63.8%, respectively.

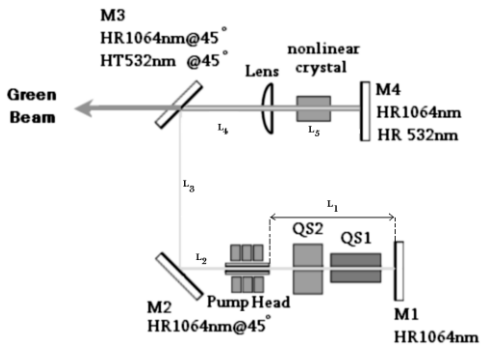
Keywords: Second harmonic generation, Nd:YAG laser, side pumped laser, U-type resonator.

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

۱- مقدمه

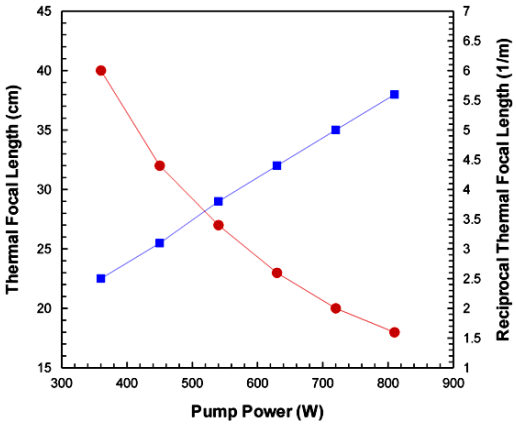
در دو دهه اخیر لیزرهای سبز بخاطر داشتن تنوع کاربردی فراوان در حوزه‌های صنعتی و پزشکی، پیشرفت‌های گسترده‌ای در زمینه طراحی و ساخت را شاهد بوده‌اند. لیزر حالت جامد Nd:YAG دمش جانبی دیودی با دوبرابرشدگی فرکانسی درون کاواکی با استفاده از بلور غیر خطی، یکی از محتمل‌ترین روشها برای بدست آوردن منبع لیزر سبز با طول موج 532nm با توان بالا است [۵-۱]. اخیرا مقاله ای در زمینه طراحی و ساخت لیزر Nd:YAG دمش جانبی دیودی Q- سوئیچ شدهٔ دو برابر شدهٔ فرکانسی با تشدیدگر U- شکل با یک سامانه دمش و یک بلور غیر خطی KTP توسط گروه مولفین مقاله حاضر گزارش شده است [۶]. در این مقاله از دو بلور غیر خطی KTP و LBO در تشدیدگر U-شکل برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG بطور جداگانه استفاده و نتایج هر یک از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- چیدمان آزمایشگاهی



شکل۱ : شمای چیدمان لیزر سبز

چیدمان لیزر بطور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. تشدیدگر U- شکل متشکل از ۴ عدد آینه تخت، یک عدد سامانه دمش، دو عدد ماژول Q- سوئیچ آکوستو-اپتیکی افقی و عمودی، یک بلور غیر خطی و یک عدسی تخت-کاو است. سامانه دمش نیز متشکل از سه واحد دمش، کاواک بازتابی با لایه نشانی نقره، میله لیزر Nd:YAG با آلایش ۰/۶درصد از یون‌های Nd^{3+} با قطر ۵mm و طول ۱۲۰mm و طول دمش ۵۰mm است. لایه نشانی روی کاواک بازتاب دمش به منظور بازگرداندن دوبارهٔ آن بخشی از توان دمش است که توسط محیط فعال جذب نشده و از آن عبور کرده است، تا سبب توزیع یکنواخت‌تر دمش در محیط فعال و سبب کاهش اتلاف دمش شود. در بازوی اول تشدیدگر، سامانه دمش و دو عدد ماژول Q- سوئیچ و آینه‌های تخت M_1 و M_2 قرار دارد. در بازوی دوم تشدیدگر، یک بلور غیر خطی (LBO یا KTP)، یک عدسی تخت-کوژ با فاصله کانونی ۱۵ cm و آینه‌های تخت M_3 و M_4 واقع شده است. برای تولید هماهنگ دوم، یکبار از بلور غیر خطی KTP نوع ۲ با ابعاد ۷mm×۷mm×۷mm ($\varphi=23.5°, \theta=90°$) و باردیگر از بلور غیر خطی LBO نوع ۲ با ابعاد ۷mm×۷mm×۱۵mm ($\varphi=23.5°, \theta=90°$) به همراه یک عدسی همگرا کننده برای کاهش شعاع باریکه لیزر اصلی در عبور از بلور غیرخطی (جهت افزایش بازده بلور غیر خطی) در تشدیدگر استفاده شده است. درجه حرارت بهینه برای کریستال KTP برابر با ۰/۱ ± ۴۵/۵° و برای کریستال LBO برابر ۰/۱ ± ۷۹° بدست آمده است.



شکل۲ : فاصله کانونی گرمایی بر حسب دمش.

۳- طراحی تشدیدگر

برای طراحی تشدیدگر پایدار نیاز به مشخص کردن فاصله کانونی گرمایی میله لیزری برای مولفه‌های قطبش r و θ است. نتایج اندازه‌گیری متوسط فاصله کانونی گرمایی با استفاده از روش CCD متحرک در شکل (۲) نشان داده شده است[۸-۷]. فاصله کانونی در ماکزیمم توان دمش ۸۱۰ وات برابر ۱۷/۸ cm است. (برای محاسبه مولفه های r و θ فاصله کانونی در شرایطی که پمپاژ برقرار می باشد از نسبت $\frac{f_r}{f_\theta}=1.2$ استفاده شده است[۸-۷].). در این مقاله، با استفاده از فواصل کانونی گرمایی اندازه‌گیری شده و شرط پایداری تشدیدگر، بطور نظری پایداری تشدیدگر بر حسب پارامترهای دمش و فواصل L_4 و L_5 مورد بررسی قرار گرفته است. قسمتی از محیط فعال که تحت دمش قرار دارد دارای ماکزیمم مقدار ضریب شکست روی محور نوری و تغییرات

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

درجه دوم با شعاع در نزدیکی محور نوری است، از این رو محیط فعال شبیه یک محیط عدسی گونه رفتار می‌کند بطوریکه ماتریس انتقال پرتو مربوط به قسمتی از میله لیزری که تحت دمش قرار گرفته است به صورت زیر معرفی می شود[۹-۸] ،

$$M_{r,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\Gamma_{r,\theta}L) & (n_0\Gamma_{r,\theta})^{-1}\sin(\Gamma_{r,\theta}L) \\ (-n_0\Gamma_{r,\theta})\sin(\Gamma_{r,\theta}L) & \cos(\Gamma_{r,\theta}L) \end{bmatrix} \quad (۱)$$

که L طول میله لیزری و n_0 ضریب شکست در مرکز میله لیزری و $\Gamma_{r,\theta}$ به صورت $(\frac{n_{2r,2\theta}}{n_0})^{1/2}$ تعریف می‌شود و پارامتر $n_{2r,2\theta}$ به صورت رابطه (۲) است،

$$n_{2r,2\theta} = n_0 \frac{4\Delta T}{R^2}(\frac{1}{2n_0}\frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\theta}) \quad (۲)$$

R شعاع میله لیزری، $\frac{dn}{dT}$ ضریب دمایی ضریب شکست، α ضریب انبساط گرمایی و $C_{r,\theta}$ تابعی از ضرایب الاستو – اپتیکی میله لیزر است[۵] و ΔT اختلاف دما بین مرکز میله و سطح میله است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۶-۵] ،

$$\Delta T = \frac{A}{4\pi L}\frac{1}{(\frac{1}{2}\frac{dn}{dT} + n_0^3\alpha C_{r,\theta})}\frac{1}{f_{r,\theta}} = \begin{pmatrix} 5.66\times10^4(r) \\ 7.07\times10^4(\theta) \end{pmatrix}\frac{R^2}{L}\frac{1}{f_{r,\theta}} \quad (۳)$$

از آنجا که دو سر میله لیزری دارای شعاع انحنا بوده و دارای طولی است که در معرض دمش قرار ندارد، ماتریس انتقال پرتو میله لیزری در اینجا به صورت رابطه (۴) نوشته می-شود،

$$M_{r,\theta}^{Rod} = [F_{curve}][L_{un}][M_{r,\theta}][L_{un}][F_{curve}] \quad (۴)$$

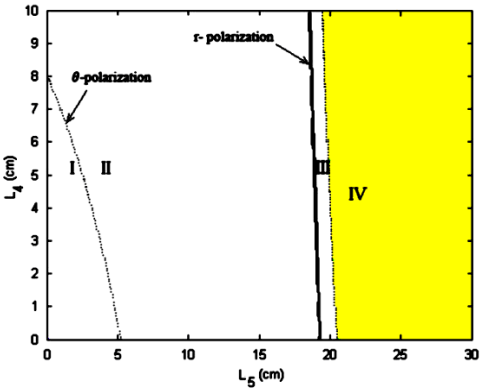
که $[M_{r,\theta}]$ ماتریس انتقال پرتو برای قسمتی از میله لیزری که در معرض دمش قرار گرفته است و $[L_{un}]$ ماتریس انتقال قسمتی از میله لیزری که در معرض دمش قرار نگرفته است و $[L_{curve}]$ ماتریس انتقال مربوط به انحنای سر میله لیزری است. برای یک رفت و برگشت، ماتریس انتقال کل برای تشدیدگر با آینه‌های تخت به صورت رابطه (۵) است،

$$M_{tot} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [L_1][M_{r,\theta}^{Rod}][L_2][L_3][L_4][M_{Lens}] \quad (۵)$$
$$[L_5][L_5][M_{Lens}][L_4][L_3][L_2][M_{r,\theta}^{Rod}][L_1]$$

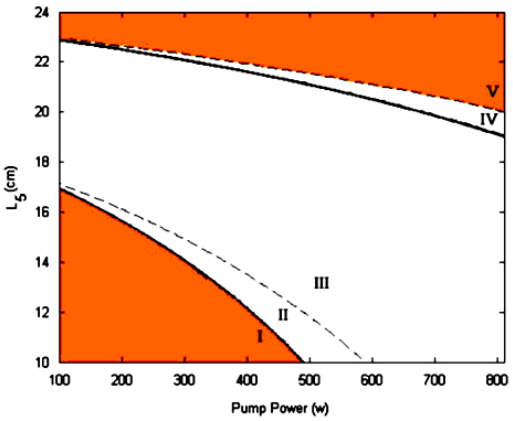
$[L_i]$ماتریس انتقال برای فواصل بین المان‌های نوری و $[M_{Lens}]$ماتریس انتقال برای عدسی واقع در بازوی دوم تشدیدگر است. شرط پایداری تشدیدگر با استفاده از عناصر ماتریسی رابطه (۵) به صورت زیر مشخص می‌شود،

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (۶)$$

و اثر بلور غیر خطی در محاسبات صرف نظر شده است. شکل (۳) نواحی پایدار تشدیدگر برای فواصل مختلف L_4 و L_5 در ماکزیمم توان دمش ۸۱۰ وات را نشان می‌دهد و شکل (۴) نواحی پایدار تشدیدگر در دمش‌های مختلف برای طول‌های مختلف L_5 را نشان می‌دهد که با بررسی شکل‌های (۳) و (۴) مقادیر بهینه و مناسب برای فواصل L_4 و L_5 به ترتیب ۳/۵ cm و ۱۷/۵ cm از تشدیدگر پایدار با فواصل مشخصL_1 و L_2 و L_3 انتخاب می‌شود؛ که علاوه بر برقراری شرط پایداری، طول تشدیدگر کوتاه و اندازه لکه‌ها بر روی آینه‌ها نیز مقدار معقول باشد.



شکل ۳ : پایداری تشدیدگر برحسب فواصل مختلف L_4 و L_5 در دمش ۸۱۰ وات.



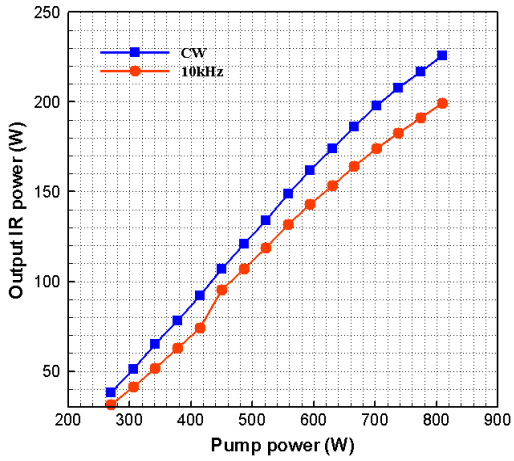
شکل۴ : پایداری تشدیدگر برحسب فواصل مختلف L_5 در دمش‌های گوناگون و L_4= ۳/۵ cm.

در شکل (۳) نواحی I ، II ، III و IV به ترتیب نواحی هستند که مولفه قطبش r، مولفه‌های قطبش r و θ، مولفه قطبش θ پایدار هستند و در ناحیه V هیچ یک از مولفه‌های قطبش پایدار نیستند. در شکل (۴) در ناحیه I و V هیچ یک از مولفه‌های قطبش پایدار نیستند و در نواحی II ، III و IV

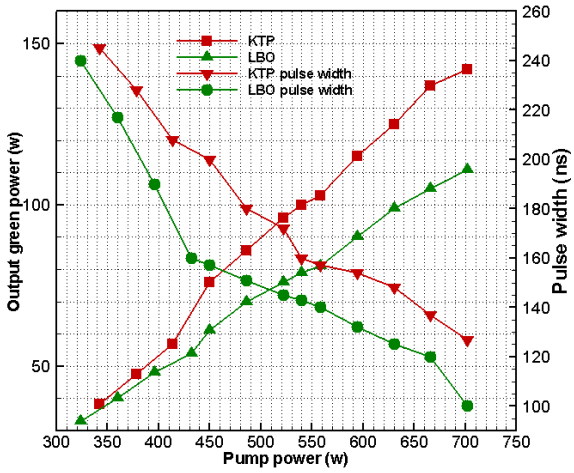
[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

به ترتیب مولفه قطبش r، مولفه‌های قطبش r و θ، مولفه قطبش θ پایدار هستند.

۴- نتایج و بررسی

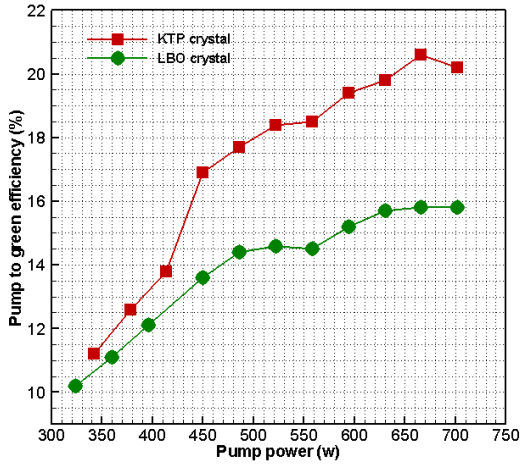


شکل۵ : توان خروجی لیزر IR بر حسب توان دمش



شکل۶ : توان خروجی لیزر سبز در حضور بلور LBO و KTP

در شکل (۵) توان لیزر با طول موج ۱۰۶۴ nm بر حسب توان دمش در دو حالت پیوسته و نرخ تکرار ۱۰KHZ نشان داده شده است. توان لیزر IR با قرار دادن آینه خروجی با بازتابندگی بهینه ٪۷۵ در انتهای بازوی دوم تشدیدگر (یعنی بجای آینه M4)، در غیاب بلور غیر خطی، اندازه‌گیری شده است، که حداکثر توان خروجی در حالت پیوسته ۲۲۶ وات و درحالت Q-سوئیچ برابر با ۱۹۹ وات با نرخ تکرار ۱۰KHZ در دمش۸۱۰ وات می‌باشد. در شکل (۶) توان لیزر سبز بر حسب توان دمش در نرخ تکرار ۱۰KHZ نشان داده شده است. حداکثر توان لیزر سبز در حضور بلور غیر خطی KTP برابر ۱۴۲ وات و در حضور بلور غیر خطی LBO برابر ۱۱۱ وات با نرخ تکرار ۱۰KHZ در دمش۷۰۲ وات هستند. پهنای تپ اندازه‌گیری شده بر حسب توان دمش در حضور هر یک از بلورهای غیر خطی در شکل (۸) نشان داده شده است. پهنای تپ لیزر سبز در دمش ۷۰۲ وات به ترتیب در حضور هر یک از بلورهای غیر خطی KTP و LBO برابر۱۲۷ns و ۱۰۰ns است. بازده تبدیل نوری هر یک از بلورهای غیر خطی KTP و LBO برابر ٪۸۱/۶ و ٪۶۳/۸ می باشد و همچنین بازده تبدیل نوری دمش به لیزر سبز به ترتیب برابر ٪۲۰/۲ و ٪۱۵/۸ بدست آمد.



شکل۷ : بازده تبدیل نوری بر حسب توان دمش

۵- نتیجه‌گیری

لیزر سبز در طول موج 532 nm با استفاده از بلورهای KTP و LBO بطور جداگانه با متوسط توان خروجی به ترتیب ۱۴۲ وات و ۱۱۱ وات در نرخ تکرار 10KHZ بدست آمد. بازده تبدیل هر یک از بلورهای KTP و LBO به ترتیب برابر ٪۸۱/۶ و ٪۶۳/۸ در تشدیدگر U شکل است. بلور LBO دارای پهنای تپ کوچک و پایداری بسیار بالا در توان خروجی بوده و از طرفی نیز دارای بازده تبدیل کمتر نسبت به بلور KTP است.

مراجع

[1] Konno S, Fujikawa S and Yasui K 1998 Appl. Opt. 37 6401.
[2] Kojima T, Fujikawa S and Yasui K 1999 IEEE J. Quantum Electron. 35 377.
[3] Konno S, Kojima T, Fujikawa S and Yasui K 2000 Opt.Lett. 25 105.
[4] Honea E C, Ebbers C A, Beach R J, Apeth J A, Skidmore J A, Emanuel M A and Payne S A 1998 Opt. Lett. 23 1203.
[5] F. Hajiesmaeilbaigi n, H. Razzaghi, M. Mahdizadeh, M.R.A.Moghaddam,M.Ruzbehani,Optics&LaserTechnology 43 (2011) 1428–1430.
[6] H.Bazyar,M.Aghaie,M.H.Daemi,S.M.Bagherzadeh, Optics and Laser Technology, Volume 47, p. 237-241.
[7] Renzhong Hua), Satoshi Wada, Hideo Tashiro, Optics Communications 175_2000.189–200
[8] Koechner W. Solid-State Laser Engineering. 4th ed. Berlin: Springer; 1996.
[9] Park JR, Lee JY, Kim HS, Um KY, Kong HJ. Optical Review 1997,4:170–5.

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