



## 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  $Q$ -سوزیج 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  $LBO$  و  $KTP$  توان لیزر سبز به ترتیب ۱۴۲ و ۱۱۱ وات در نرخ تکرار  $10\text{kHz}$  با پهنهای تپ به ترتیب  $127\text{ns}$  و  $100\text{ns}$  بدست آمده است. بازده تبدیل نوری برای بلورهای  $KTP$  و  $LBO$  در این طراحی به ترتیب  $81.6\%$  و  $63.8\%$  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

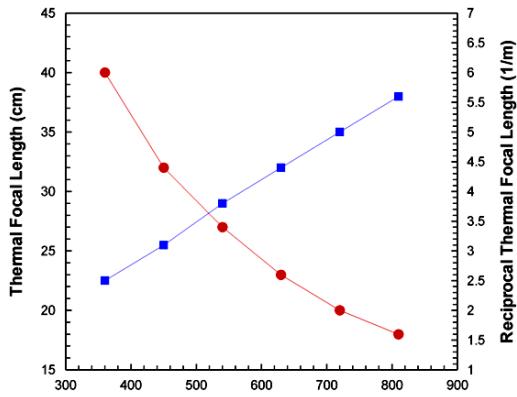
Mohammad Aghaie , Mojtaba Moslehian, Mahdi Rajaei Jafarabadi, Ali Modiri and Hossein Bazyar

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.

سامانه دمش و دو عدد مازول Q- سوئیچ و آینه‌های تخت M<sub>1</sub> و M<sub>2</sub> قرار دارد. در بازوی دوم تشیدیدگر، یک بلور غیر خطی (LBO یا KTP) یک عدسی تخت-کوژ با فاصله کانونی ۱۵ cm و آینه‌های تخت M<sub>3</sub> و M<sub>4</sub> واقع شده است. برای تولید هماهنگ دوم، یکبار از بلور غیر خطی KTP نوع ۲ با ابعاد ۷mm×۷mm×۷mm (φ=23.5°, θ=90°) و باردیگر از بلور غیر خطی LBO نوع ۲ با ابعاد ۷mm×۷mm×۱۵mm (φ=23.5°, θ=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 تشیدیدگر استفاده شده است. درجه حرارت بهینه برای کریستال KTP برابر با ۰/۱ ± ۴۵/۵° و برای کریستال LBO توسط گروه مولفین مقاله حاضر گزارش شده است [۶]. در این مقاله از دو بلور غیر خطی KTP و LBO در تشیدیدگر U-شکل برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG بطور جداگانه استفاده و نتایج هر یک از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۲ : فاصله کانونی گرمایی بر حسب دمش.

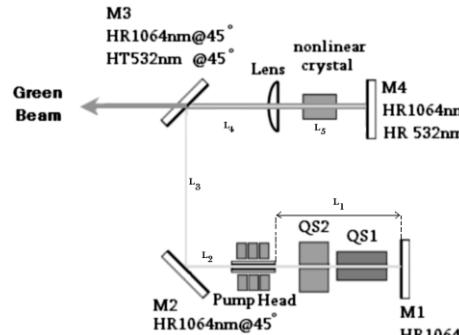
### ۳- طراحی تشیدیدگر

برای طراحی تشیدیدگر پایدار نیاز به مشخص کردن فاصله کانونی گرمایی میله لیزری برای مولفه‌های قطبی  $r$  و  $\theta$  است. نتایج اندازه‌گیری متوسط فاصله کانونی گرمایی با استفاده از روش CCD متحرک در شکل (۲) نشان داده شده است [۷-۸]. فاصله کانونی در ماکریتمم توان دمش ۸۱۰ وات برابر ۱۷/۸ cm است. (برای محاسبه مولفه‌های  $r$  و  $\theta$  فاصله کانونی در شرایطی که پمپاژ برقرار می‌باشد از نسبت  $\frac{f_r}{f_\theta} = 1.2$  استفاده شده است [۷-۸]). در این مقاله، با استفاده از فواصل کانونی گرمایی اندازه‌گیری شده و شرط پایداری تشیدیدگر، بطور نظری پایداری تشیدیدگر بر حسب پارامترهای دمش و فواصل L<sub>4</sub> و L<sub>5</sub> مورد بررسی قرار گرفته است. قسمتی از محیط فعال که تحت دمش قرار دارد دارای ماکریتمم مقدار ضریب شکست روی محور نوری و تغییرات

### 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 دوباره‌رشدگی 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 [۱-۵]. اخیراً مقاله‌ای در زمینه طراحی و ساخت لیزر Nd:YAG دمش جانبی دیودی Q- سوئیچ شده دو برابر شده فرکانسی با تشیدیدگر 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 تشیدیدگر U-شکل برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG بطور جداگانه استفاده و نتایج هر یک از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

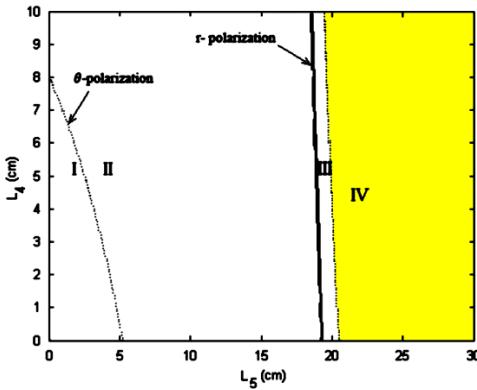
### ۲- چیدمان آزمایشگاهی



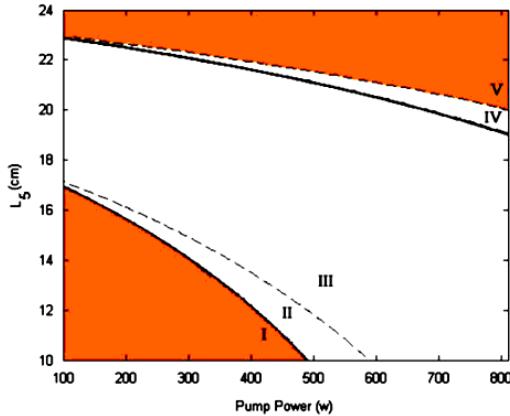
شکل ۱ : شماتیک چیدمان لیزر سبز

چیدمان لیزر بطور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. تشیدیدگر U- شکل متشکل از ۴ عدد آینه تخت، یک عدد سامانه دمش، دو عدد مازول 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 ۶/۰ درصد از یون‌های Nd<sup>3+</sup> با قطر ۵ mm و طول ۱۲۰ mm و طول دمش ۵۰ mm است. لایه نشانی روی کاواک بازتاب دمش به منظور بازگرداندن دوباره 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 تشیدیدگر،

و اثر بلور غیر خطی در محاسبات صرف نظر شده است. شکل (۳) نواحی پایدار تشیدیدگر برای فواصل مختلف  $L_4$  و  $L_5$  در ماکریم توان دمش ۸۱۰ وات را نشان می‌دهد و شکل (۴) نواحی پایدار تشیدیدگر در دمsh‌های 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  $3/5\text{ cm}$  و  $17/5\text{ cm}$  از تشیدیدگر پایدار با فواصل مشخص  $L_1$  و  $L_2$  انتخاب می‌شود؛ که علاوه بر برقراری شرط پایداری، طول تشیدیدگر کوتاه و اندازه لکه‌ها بر روی آینه‌ها نیز مقدار معقول باشد.



شکل ۳ : پایداری تشیدیدگر بر حسب فواصل مختلف  $L_4$  و  $L_5$  در دمsh ۸۱۰ وات.



شکل ۴ : پایداری تشیدیدگر بر حسب فواصل مختلف  $L_5$  در دمsh‌های گوناگون و  $L_4 = 3/5\text{ cm}$

در شکل (۳) نواحی I ، II ، III و IV به ترتیب نواحی هستند که مولفه قطبش  $r$ ، مولفه‌های قطبش  $r$  و  $\theta$ ، مولفه قطبش  $\theta$  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

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 دمsh قرار گرفته است به صورت زیر معرفی می‌شود [۸-۹] ،

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

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،

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

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

$$\Delta T = \frac{A}{4\pi L} \frac{1}{\left( \frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha C_{r,\theta} \right)} \frac{1}{f_{r,\theta}} = \frac{\left( 5.66 \times 10^4(r) \right) R^2}{\left( 7.07 \times 10^4(\theta) \right) L} \frac{1}{f_{r,\theta}} \quad (3)$$

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

$$M_{r,\theta}^{Rod} = [F_{curve}] [L_{un}] [M_{r,\theta}] [L_{un}] [F_{curve}] \quad (4)$$

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

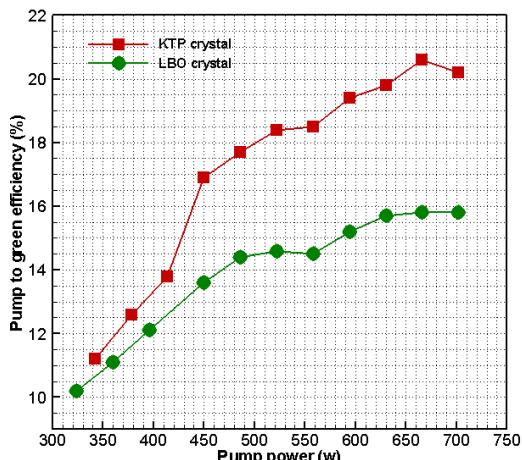
$$M_{tot} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = [L_1] [M_{r,\theta}^{Rod}] [L_2] [L_3] [L_4] [M_{Lens}] \quad (5)$$

$$[L_5] [L_5] [M_{Lens}] [L_4] [L_3] [L_2] [M_{r,\theta}^{Rod}] [L_1]$$

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

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1 \quad (6)$$

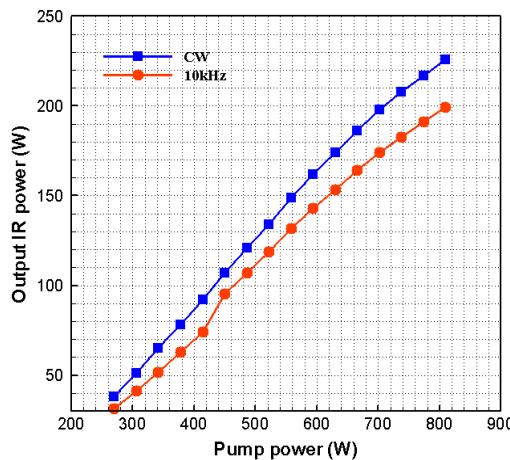
از بلورهای غیر خطی در شکل (۸) نشان داده شده است. پهنهای تپ لیزر سبز در دمچه ۷۰۲ وات به ترتیب در حضور هر یک از بلورهای غیر خطی KTP و LBO برابر ۱۲۷ns و ۱۰۰ns است. بازده تبدیل نوری هر یک از بلورهای غیر خطی KTP و LBO برابر ۸۱/۶٪ و ۶۳/۸٪ می باشد و همچنین بازده تبدیل نوری دمچه به لیزر سبز به ترتیب برابر ۲۰/۲٪ و ۱۵/۸٪ بودست آمد.



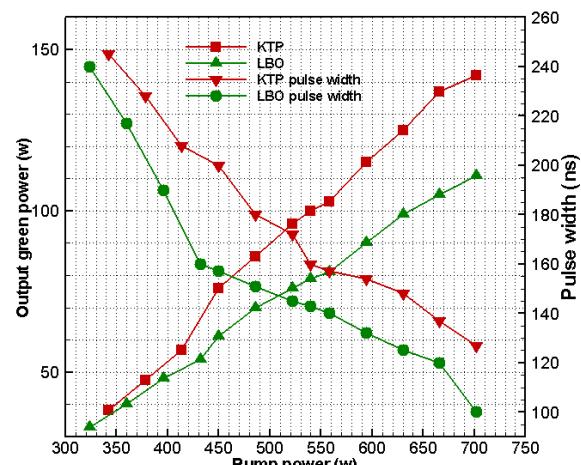
شکل ۷: بازده تبدیل نوری بر حسب توان دمچه

به ترتیب مولفه قطبش  $r$ ، مولفه‌های قطبش  $r$  و  $\theta$ ، مولفه قطبش  $\theta$  پایدار هستند.

#### ۴- نتایج و بررسی



شکل ۵: توان خروجی لیزر IR بر حسب توان دمچه



شکل ۶: توان خروجی لیزر سبز در حضور بلور LBO و KTP

در شکل (۵) توان لیزر با طول موج ۱۰۶۴ nm بر حسب توان دمچه در دو حالت پیوسته و نرخ تکرار ۱۰ KHZ 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 در حالت Q-سوئیچ برابر با ۱۹۹ وات با نرخ تکرار ۱۰ KHZ در دمچه ۸۱۰ وات می‌باشد. در شکل (۶) توان لیزر سبز بر حسب توان دمچه در نرخ تکرار ۱۰ KHZ 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 ۱۰ KHZ در دمچه ۷۰۲ وات هستند. پهنهای تپ اندازه‌گیری شده بر حسب توان دمچه در حضور هر یک

#### 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. Hajiesmaeilbaigini, 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.