



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران  
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - 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 ۱۴۲ وات و ۱۱۱ وات در نرخ تکرار  $10\text{kHz}$  با پهنای تپ به ترتیب  $127\text{ns}$  و  $100\text{ns}$  بدست آمده است. بازده تبدیل نوری برای بلورهای  $LBO$  و  $KTP$  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

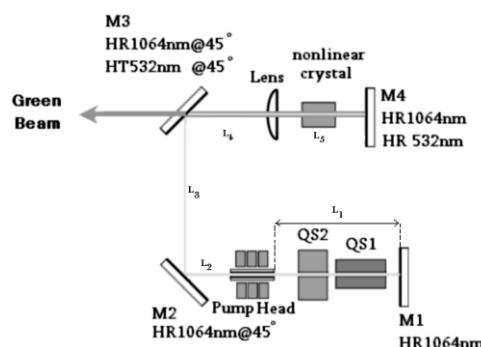
Abstract- In this paper, A U-type resonator design and fabrication for intra-cavity frequency doubling of a diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser with high power and high stability power. The resonator stability conditions were analyzed graphically for various resonator length and pump powers 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.

## 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 دوبرابردگی 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]. اخیراً مقاله ای در زمینه طراحی و ساخت لیزر Nd:YAG دمش جانبی دیودی Q-سوئیچ شده دو برابر شده 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.

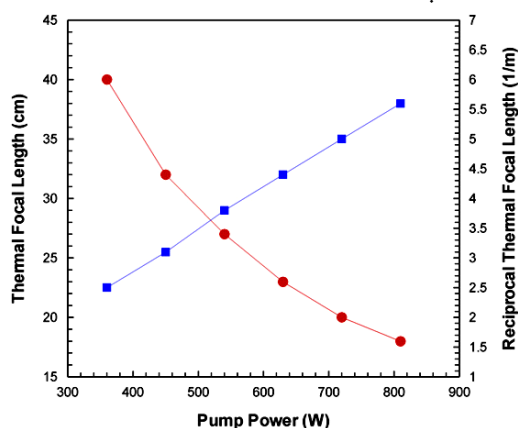
## ۲- چیدمان آزمایشگاهی



شکل ۱: 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 آرایش ۰/۶ درصد از یون‌های  $Nd^{3+}$  با قطر ۵mm و طول ۱۲۰mm و طول دمش ۵۰mm 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 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 ۱۵cm 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  $7mm \times 7mm \times 7mm$  ( $\varphi = 23.5^\circ, \theta = 90^\circ$ ) و بار دیگر از بلور غیر خطی LBO نوع ۲ با ابعاد  $7mm \times 7mm \times 15mm$  ( $\varphi = 23.5^\circ, \theta = 90^\circ$ ) 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  $0.1 \pm 45/5^\circ$  و برای کریستال LBO برابر  $0.1 \pm 79^\circ$  بدست آمده است.

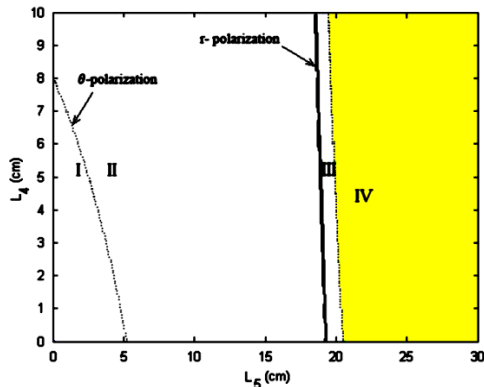


شکل ۲: فاصله کانونی گرمایی بر حسب دمش.

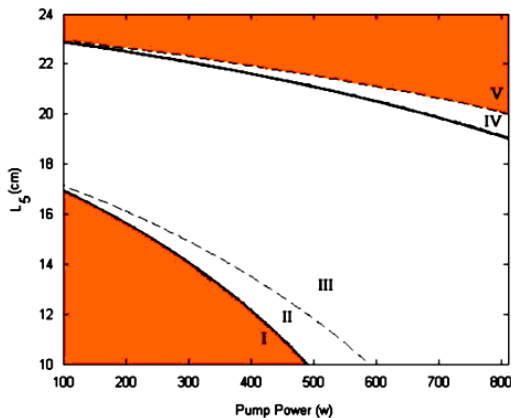
## ۳- طراحی تشدیدگر

برای طراحی تشدیدگر پایدار نیاز به مشخص کردن فاصله کانونی گرمایی میله لیزری برای مولفه‌های قطبش  $r$  و  $\theta$  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  $17/8cm$  است. (برای محاسبه مولفه‌های  $r$  و  $\theta$  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

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  $3/5\text{ cm}$  و  $17/5\text{ cm}$  از تشدیدگر پایدار با فواصل مشخص  $L_1$  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.



شکل ۴: پایداری تشدیدگر برحسب فواصل مختلف  $L_5$  در دمش‌های 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 دمش قرار گرفته است به صورت زیر معرفی می‌شود [۹-۸]،

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

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،

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

$R$  شعاع میله لیزری،  $\frac{dn}{dT}$  ضریب دمایی 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 [۶-۵]،

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

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

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

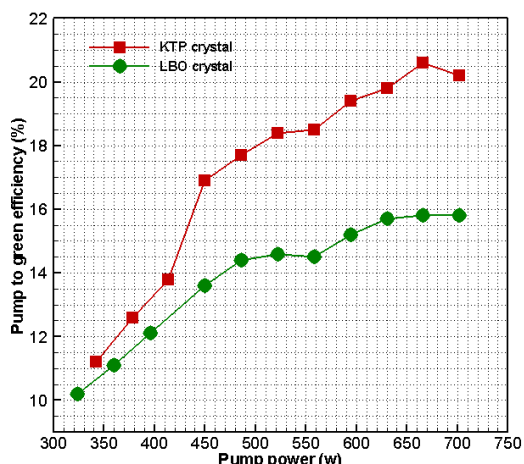
که  $[M_{r,\theta}]$  ماتریس انتقال پرتو برای قسمتی از میله لیزری که در معرض دمش قرار گرفته است و  $[L_{un}]$  ماتریس انتقال قسمتی از میله لیزری که در معرض دمش قرار نگرفته است و  $[L_{curve}]$  ماتریس انتقال مربوط به انحنای سر میله لیزری است. برای یک رفت و برگشت، ماتریس انتقال کل برای تشدیدگر با آینه‌های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

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

$[L_i]$  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،

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

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 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 دمش به لیزر سبز به ترتیب برابر ۲۰/۲٪ و ۱۵/۸٪ بدست آمد.



شکل ۷: بازده تبدیل نوری بر حسب توان دمش

#### ۵- نتیجه گیری

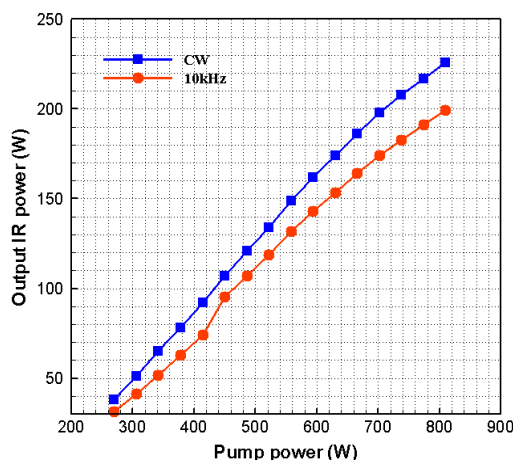
لیزر سبز در طول موج 532 nm با استفاده از بلورهای KTP و LBO بطور جداگانه با متوسط توان خروجی به ترتیب ۱۴۲ وات و ۱۱۱ وات در نرخ تکرار 10KHZ بدست آمد. بازده تبدیل هر یک از بلورهای KTP و LBO به ترتیب برابر ۸۱/۶٪ و ۶۳/۸٪ در تشدیدگر U شکل است. بلور LBO دارای پهنای تپ کوچک و پایداری بسیار بالا در توان خروجی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

#### مراجع

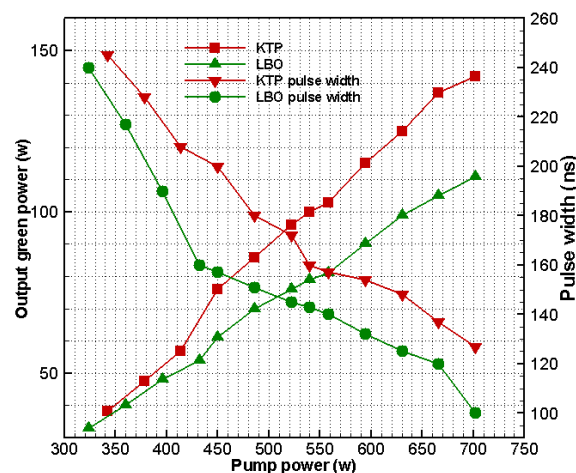
- [1] Konno S, Fujikawa S and Yasui K 1998 Appl. Opt. 37 6401.
- [2] Kojima T, Fujikawa S and Yasui K 1999 IEEE J. Quantum Electron. 35 377.
- [3] Konno S, Kojima T, Fujikawa S and Yasui K 2000 Opt.Lett. 25 105.
- [4] Honea E C, Ebberts C A, Beach R J, Apeth J A, Skidmore J A, Emanuel M A and Payne S A 1998 Opt. Lett. 23 1203.
- [5] F. Hajiesmaeilbaigi n, H. Razzaghi, M. Mahdizadeh, M.R.A.Moghaddam, M.Ruzbehani, Optics&Laser Technology 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.

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

#### ۴- نتایج و بررسی



شکل ۵: توان خروجی لیزر IR بر حسب توان دمش



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 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، اندازه گیری شده است، که حداکثر توان خروجی در حالت پیوسته ۲۲۶ وات و در حالت Q-سوئیچ برابر با ۱۹۹ وات با نرخ تکرار ۱۰KHZ در دمش ۸۱۰ وات می باشد. 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 دمش ۷۰۲ وات هستند. پهنای تپ اندازه گیری شده بر حسب توان دمش در حضور هر یک