



## تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YVO<sub>4</sub> در چیدمان یک طرفه حلقوی توسط بلور KTP: بررسی اثرات گرمایی بلور TGG

امین احمدی<sup>۱</sup>، ابوالقاسم عوض پور<sup>۱</sup>، حمید نادگران<sup>۲</sup>، مهدی موسوی<sup>۲</sup>، امید پناهی<sup>۳</sup>، علیرضا مجتبی<sup>۳</sup>، مهرداد خیراللهی<sup>۳</sup>

۱- یاسوج، دانشگاه یاسوج، دانشکده علوم، بخش فیزیک

۲- شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

۳- کارشناس ارشد فیزیک

چکیده - در این مقاله اثرات گرمایی بلور تربیوم گالیوم گارنت (TGG) و تاثیر آن بر خصوصیات باریکه لیزر سبز Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP یک طرفه حلقوی بررسی شده است. توان خروجی و کیفیت باریکه تحت تاثیر خواص بلور TGG قرار گرفتند. در نهایت ۵/۷ وات لیزر سبز با بازده ۲۲٪ و پایایی ۰/۸٪ در ۳۰ دقیقه و فاکتور M<sup>2</sup> بهتر از ۱/۲ به دست آمد.

کلید واژه- اثرات گرمایی، تربیوم گالیوم گارنت، تولید هماهنگ دوم، لیزر یک طرفه حلقوی

## Second harmonic generation of Nd:YVO<sub>4</sub> laser in unidirectional ring configuration by KTP: investigation of TGG thermal effects

A. Ahmadi<sup>1</sup>, A. Avazpour<sup>1</sup>, H. Nadgaran<sup>2</sup>, M. Mousavi<sup>2</sup>, O. Panahi<sup>3</sup>, A. Mojtaba<sup>3</sup>, M. Kheirollahi<sup>3</sup>

1- Yasouj, Yasouj university, college of science, physics department

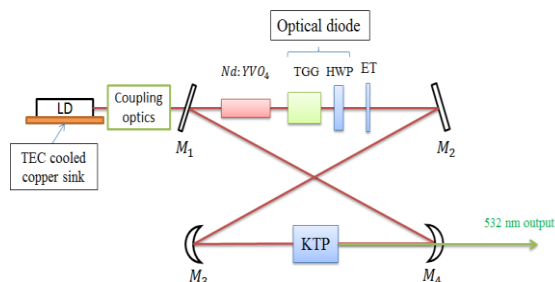
2- Shiraz, Shiraz university, college of science, physics department

3- Master of physics

Abstract- The influence of TGG crystal thermal effects on beam characteristics of a unidirectional ring Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser is investigated. output power and beam quality factor are under the influence of TGG crystal thermal effects. Finally, 5.7 W green laser with 22% efficiency and 0.8 % power stability for 30 minutes and M<sup>2</sup> factor better than 1.2 is produced.

Keywords: thermal effects, terbium gallium garnet, second harmonic generation, unidirectional ring laser

## ۱- مقدمه



شکل ۱: چیدمان لیزر یک طرفه حلقوی Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP. LD: دیود لیزری، HWP: تیغه نیم موج، ET: اتالون.

بلور KTP نیز با ابعاد  $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$  در فاصله بین آینه-های  $M_3$  و  $M_4$  و در محل کمر باریکه قرار گرفته است. این بلور برای نوع II تطابق فاز ( $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=23.5^\circ$ ) برش یافته است. به منظور عملکرد پایای لیزر، بلور KTP نیز توسط ورق ایندیوم پوشانده شده است و در یک سینک مسی که دمای آن توسط ترمو-الکتریک کولر کنترل می‌شود قرار گرفته است. به منظور عملکرد لیزر در حالت تک مد طولی، یک اتالون با ضخامت ۳۰۰ میکرون و بدون پوشش در چیدمان قرار گرفته است.

## ۳- طراحی چیدمان

رابطه مربوط به توان درون کاواکی در چیدمان توضیح داده شده در قسمت قبل را می‌توان به صورت زیر نوشت [۷]:

$$P = \pi \omega^2 \frac{-\left(\frac{L}{I_0} + K_{NC}\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{I_0} + K_{NC}\right)^2 - 4 \frac{K_{NC}}{I_0} (L - g_0 l_0)}}{2 \frac{K_{NC}}{I_0}} \quad (1)$$

که  $L$  افت خطی رفت و برگشت،  $I_0$  شدت اشباع،  $K_{NC}$  ضریب تبدیل غیرخطی،  $g_0$  ضریب بهره سیگنال کوچک،  $l_0$  طول محیط بهره می‌باشند. از طرفی، فاصله کانونی عدسی گرمایی یک بلور دمش شده از انتها به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$f = \frac{\pi K_c \omega_T^2}{\eta P \frac{dn}{dT}} \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \quad (2)$$

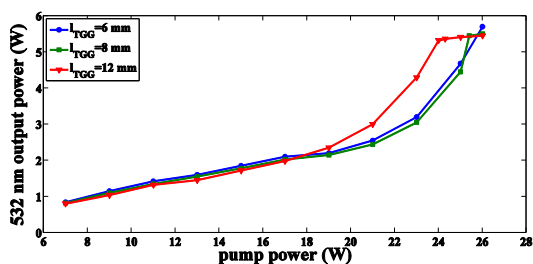
در این رابطه،  $K_c$  و  $\frac{dn}{dT}$  به ترتیب ضریب هدایت گرمایی و

تولید هماهنگ دوم درون کاواکی در لیزر وانادیت دمش از انتها توسط بلورهای غیرخطی KTP و LBO یک روش معمول برای تولید لیزرهای سبز موج پیوسته می‌باشد [۱] و [۲]. این لیزرها با نوفه شدت پایین و کیفیت باریکه خوب کاربردهای فراوانی در صنعت و پزشکی دارند [۳]. مهمترین چالش ساخت این نوع لیزرها نیز کاهش نوفه موجود در آن می‌باشد و روش‌های مختلفی برای انجام آن معرفی شده است [۴] و [۵]. استفاده از لیزرهای یک طرفه حلقوی توسط قرار دادن یک دیود نوری متشکل از بلور تربیوم گالیوم گارنت (TGG) و یک تیغه نیم موج نیز یک روش مناسب می‌باشد [۶]. اثبات شده است که عدسی سازی گرمایی بلور TGG بر عملکرد این نوع لیزرها موثر است [۷]. اما اثر خواص گرمایی این بلور بر کارایی لیزر همچنان به عنوان یک مساله باقی مانده است. در این مقاله سعی خواهد شد که این مسئله به صورت تجربی و تئوری مورد بحث قرار گیرد.

## ۲- چیدمان تجربی

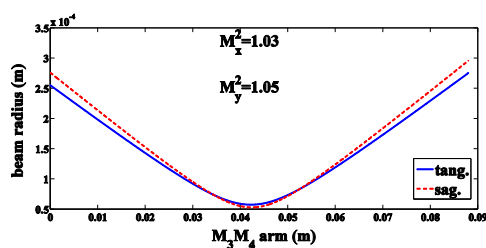
شکل (۱) چیدمان لیزر یک طرفه حلقوی Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP را نشان می‌دهد. منبع دمش، یک لیزر دیودی با طول موج ۸۰۸ نانومتر و توان حداکثر ۴۰ وات است و قطر فیبر آن برابر با ۲۰۰ میکرون است. نور این لیزر توسط یک سیستم جفت کننده متشکل از ۴ عدسی بر روی محیط بهره متمرکز می‌شود. آینه  $M_1$  یک آینه تخت دمشی با پوشش ضد بازتاب (AR) در طول موج ۸۰۸ nm و پوشش بازتاب بالا (HR) در طول موج ۱۰۶۴ nm می‌باشد. آینه  $M_2$  نیز یک آینه تخت با پوشش HR در طول موج ۱۰۶۴ nm می‌باشد. آینه  $M_3$  یک آینه تخت-مقعر با شعاع انحنای  $R=100 \text{ mm}$  و پوشش یکسان با آینه  $M_2$  می‌باشد. آینه  $M_4$  نیز آینه خروجی سبز با شعاع انحنای ۱۰۰ mm و پوشش HR در طول موج ۱۰۶۴ و پوشش عبور بالا (HT) در طول موج ۵۳۲ nm می‌باشد. محیط بهره نیز بلور وانادیت با ابعاد  $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$  و درصد آلاییدگی ۰/۵٪ می‌باشد که اطراف آن توسط ورق ایندیوم پوشانده شده و در داخل یک سینک گرمایی مسی آب خنک قرار گرفته است.

جابجایی در توان دمشی بهینه به اندازه ۱ وات می باشد که ما دلیل آن را اثرات گرمایی بلور KTP می دانیم. در نزدیکی توان دمشی بهینه، توان خروجی به طور ناگهانی افزایش می یابد و به حدود ۵/۷ وات و بازده تقریبی ۲۲٪ می رسد. بعد از توان دمشی بهینه نیز، نرخ افزایش توان به شکل قابل توجهی کاهش می یابد.

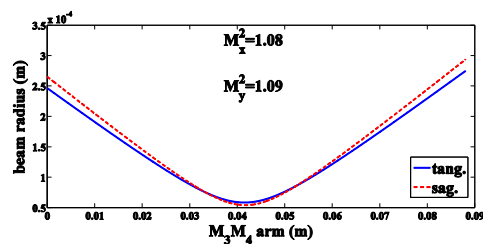


شکل ۳: توان خروجی لیزر در طول موج ۵۳۲ nm بر حسب توان دمشی برای سه طول متفاوت بلور TGG

از نقطه نظر کیفیت باریکه و اثر طول بلور TGG بر روی آن، فاکتور  $M^2$  برای هر سه حالت به صورت تئوری محاسبه و در شکل های (۴)، (۵) و (۶) رسم شده است. اختلاف کم بین  $M_x^2$  و  $M_y^2$  ناشی از آستیگماتیسم موجود در سیستم می باشد. از طرفی بلور با طول کوتاه تر کیفیت باریکه بهتری دارد. این مسئله را می توان به خاطر اثرات گرمایی قوی تر در بلور TGG بلندتر دانست [۱۰]. در شکل (۱۰) نیز یک نمونه از پروفایل لیزر به عنوان مثال آورده شده است. فاکتور  $M^2$  در همه مراحل آزمایش کمتر از ۱/۲ بود.

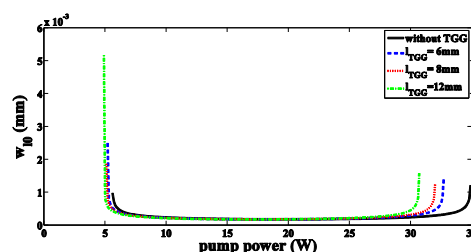


شکل ۴: کیفیت باریکه لیزر خروجی از چیدمان لیزر با طول بلور TGG برابر با ۶ mm



ضریب گرمایی-نوری بلور TGG می باشد،  $\eta$  ضریب تبدیل گرمایی است که برابر ۱ در نظر گرفته می شود زیرا تمام توان جذب شده در بلور TGG تبدیل به گرما می شود.  $\alpha$  و  $l$  نیز به ترتیب ضریب جذب و طول بلور TGG می باشند.

اثرات گرمایی بلور وانادیت و روند بهینه سازی آن به طور کامل در مقالات بسیاری مورد بحث قرار گرفته است و در اینجا نتایج آن ها مورد استفاده قرار می گیرد [۹]. بعد از انجام بهینه سازی های مربوطه و در نظر گرفتن بلور TGG به عنوان یک عدسی نازک در محاسبات ABCD، می توان چیدمان شکل (۱) را برای سه طول مختلف بلور TGG، ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر طراحی کرد. نتیجه به دست آمده در شکل (۲) نشان داده شده است. رفتار مجانبی در دو سمت این نمودارها، نشان دهنده خروج لیزر از حالت پایدار می باشد. مهمترین تفاوت برای این ۳ بلور، اختلاف در طول بازوی  $M_3M_4$  می باشد به طوری که این طول برای بلورهای ۶، ۸ و ۱۲ میلی متری برابر با ۸۸، ۸۷ و ۸۴ میلی متر می باشد. این طول در صورتی که اثرات گرمایی بلور TGG در نظر گرفته نشود برابر با ۹۰ میلی متر است.



شکل ۲: شعاع لکه لیزری در محیط بهره بر حسب توان پمپ با و بدون در نظر گرفتن اثرات گرمایی بلور TGG برای سه طول متفاوت این بلور.

مطابق با این شکل، توان آستانه برای هر سه ساختار حدوداً یکسان و برابر با ۵ وات می باشد. اما توان دمشی بهینه برای سه ساختار متفاوت و به ترتیب برای بلورهای ۶، ۸ و ۱۲ میلی متری مقادیری برابر با ۲۶، ۲۶/۵ و ۲۴/۹ وات را داراست.

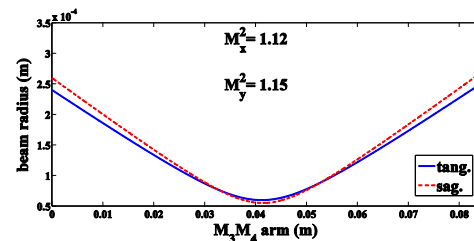
#### ۴- نتایج تجربی

شکل (۳) توان خروجی تجربی به دست آمده را بر حسب توان دمشی را برای سه ساختار نشان می دهد. در توان های دمشی پایین، هر سه ساختار رفتار یکسانی را دارند و توان خروجی یکسان با بازده پایین دارند. نکته مهم در این شکل،

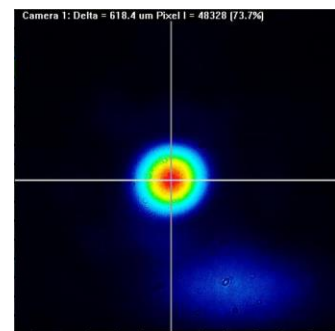
## مراجع

- [1] Kalachnikov, M. P., Karpov, V., Schönnagel, H., and Sandner, W., "100-terawatt titanium-sapphire laser system." Laser physics, Vol. 12, No. 2, pp. 368-374, 2002.
- [2] Han, X., and Zeng, H., "Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser with an additional intra-cavity nonlinear medium." Opt. exp. Vol. 16, No. 23, pp. 18875-18880, 2008.
- [3] Nogueira, G. T., Xu, B., Coello, Y., Dantus, M., & Cruz, F. C., "Broadband 2.12 GHz Ti:sapphire laser compressed to 5.9 femtoseconds using MIIPS", Opt. exp. Vol. 16, No. 14, pp. 10033-10038, 2008.
- [4] Baer, T., "Large-amplitude uctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG lasers." JOSA B, Vol. 3, No.9, pp. 1175-1180, 1986.
- [5] Risk, William Paul, Timothy R. Gosnell, and Arto V. Nurmikko, *Compact blue-green lasers*. Cambridge university press, 2003.
- [6] Zheng, Y., Li, F., Wang, Y., Zhang, K., and Peng, K., "High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd : YVO4 as a polarizing beam splitter." Opt. Comm. Vol. 283, No. 2, pp. 309-312, 2010.
- [7] Yin, Q., Lu, H., and Peng, K., "Investigation of the thermal lens effect of the TGG crystal in high-power frequency-doubled laser with single frequency operation." Opt. exp. Vol. 23, No. 4, pp. 4981-4990, 2015.
- [8] W. Koechner and W. Bss, "solid state lasers: a graduate text", springer, New York, 2003.
- [9] Xiong, Z., Li, Z. G., Moore, N., Huang, W. L., and Lim, G. C., "Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd : YVO4 lasers." IEEE journal of quantum electronics, Vol. 38, No. 8, pp. 979-986, 2003.
- [10] Jalali, A. A., Rybarsyk, J., & Rogers, E., "Thermal lensing analysis of TGG and its effect on beam quality." Opt. Exp., Vol. 21, No. 11, pp. 13741-13747, 2013.

شکل ۵: کیفیت باریکه لیزر خروجی از چیدمان لیزر با طول بلور TGG برابر با  $\lambda_{mm}$



شکل ۶: کیفیت باریکه لیزر خروجی از چیدمان لیزر با طول بلور TGG برابر با  $12mm$



شکل ۷: نمونه‌ای از پروفایل لیزر ثبت شده در آزمایشگاه

## ۵- نتیجه گیری

به طور خلاصه اثر خواص گرمایی بلور TGG بر بهینه‌سازی و پارامترهای باریکه خروجی یک لیزر دمش از انتهای یک طرفه حلقوی Nd:YVO4/KTP بررسی شده است. سه بلور TGG با طول‌های متفاوت در داخل مشدد با طراحی مربوط به هر بلور، قرار داده شده است. لحاظ کردن اثر گرمایی بلور در روند طراحی، باعث کاهش طول بازوی  $M_3M_4$  از ۹۰ میلی‌متر به ۸۸، ۸۷ و ۸۴ میلی‌متر به ترتیب برای طول‌های ۶، ۸ و ۱۲ میلی‌متر طول بلور می‌شود. در این شرایط، هر سه ساختار توان آستانه تقریباً یکسانی داشتند اما توان دمشی بهینه با افزایش طول بلور کاهش یافت. از نقطه نظر توان خروجی، نزدیک به توان دمشی بهینه یک افزایش ناگهانی مشاهده شد. در بهترین حالت لیزر سبز با توان ۵/۷ وات و بازده ۲۲٪ و پایایی ۰/۸٪ در مدت ۳۰ دقیقه به دست آمد. از نقطه نظر کیفیت باریکه، مشخص شد که به دلیل اثرات گرمایی قوی‌تر در بلورهای با طول بیشتر، کیفیت باریکه پایین‌تری مشاهده می‌شود. در همه آزمایشات انجام شده نیز کیفیت باریکه مقداری کمتر از ۱/۲ را داشت.