بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

# اثر طول بلور TGG بر توان خروجی لیزر وانادیت یک طرفه حلقوی دمش از انتها

امین احمدی[۱]، ابوالقاسم عوض پور[۱]، حمید نادگران[۲]، مهدی موسوی[۲]، جواد صادقی[۲]، علی شیری[۲]

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

۲- شیراز، دانشگاه شیراز دانشکده علوم، بخش فیزیک

**چکیده – در این مقاله اثر طول بلور *TGG* بر نحوه بهینه‌سازی و عملکرد لیزر وانادیت یک طرفه حلقوی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور با انالیز عددی فاصله کانونی عدسی گرمایی بلور *TGG* و در نظر گرفتن آن به عنوان یک عدسی نازک در داخل مشدد، روند بهینه سازی لیزر برای طول‌های متفاوت این بلور مورد بازبینی قرار گرفته است. به منظور عملکرد بهینه، بلورهای با طول بیشتر، می‌بایست طول مشدد کوتاهتری داشته باشند و همزمان توان دمشی بهینه محاسبه شده برای آن‌ها کمتر به دست می‌آید. در ادامه با برپایی چیدمان لیزر، نتایج تجربی با نتایج تئوری مورد مقایسه قرار گرفت که همخوانی خوبی را با هم نشان دادند. در نهایت برای هر سه بلور توان خروجی در حدود ۵/۵ وات و بازده لیزری در حدود ۲۰٪ به دست آمد.**

کلید واژه- تربیوم گالیوم گارنت، چرخنده فارادی، دیود نوری، عدسی سازی گرمایی، لیزر یک طرفه حلقوی

# The effects of TGG crystal length on output power of end-pumped unidirectional ring vanadate laser

A. Ahmadi[1], A. Avazpour[1], H. Nadgaran[2], M. Mousavi[2], J. Sadeghi[2], A. Shiri[2]

1- Yasouj, Yasouj university, College of Science, physics department

2- Shiraz, Shiraz university, College of Science, physics department.

Abstract- In this article, the effects of TGG crystal length on optimization and operation of unidirectional ring vanadate laser have been considered. For this purpose, with numerical analysis of thermal lensing of TGG crystal and considering it as a thin lens in the resonator, the optimization for different lengths of TGG crystal have been done. We obtained that for Optimum Performance, the longer crystals should have shorter resonator and the obtained optimal pump power should be lower than the shorter crystals. Then, experimental results were compared with theoretical results and they were in a good agreement. Finally, for all three crystals, output power and laser efficiency were about 5.5 W and 20% respectively.

Keywords: terbium gallium garnet, faraday rotator, optical diode, thermal lensing, unidirectional ring laser



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]

## ۱- مقدمه

دیود نوری از یک چرخنده فارادی و یک تیغه نیم موج تشکیل شده است و از آن برای یک طرفه کردن مشدد استفاده می‌شود [۱]. چرخنده فارادی در واقع یک بلور مگنتو-اپتیکی می‌باشد که توسط یک میدان مغناطیسی احاطه شده است. بلور تربیوم گالیوم کارنت (TGG) به دلیل آستانه تخریب بالا و ثابت وردت بزرگ در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، یکی از بهترین بلورهای مگنتو-اپتیکی به منظور استفاده در چرخنده فارادی در این طول موج می‌باشد. اما اثرات گرمایی این بلور به مانند محیط بهره، در عملکرد لیزر می‌تواند موثر باشد و چندین مقاله این مسئله را مورد بررسی قرار داده‌اند [۲-۴]. اما تاثیر طول این بلور بر عملکرد لیزر تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله اثر طول بلور TGG بر بهینه سازی لیزر حلقوی یک طرفه در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بهینه سازی لیزر

روند بهینه‌سازی لیزر به این صورت است که با محاسبه اثرات گرمایی، افت‌های پراشی القایی گرمایی محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن این افت‌ها، نسبت بهینه شعاع لکه لیزری در محیط بهره به شعاع لکه دمشی محاسبه می‌گردد. در انتها نیز با در نظر گرفتن محیط بهره به صورت یک عدسی نازک و انجام محاسبات ABCD، طول‌های مشدد به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که این نسبت بهینه به صورت عملی برقرار شود.

اثرات گرمایی بلور وانادیت دمش شده از انتها در مقالات بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است و در این مقاله از نتایج آن‌ها استفاده خواهد شد [۵-۷]. مجموع افت‌های یک مشدد را می‌توان به صورت مجموع سه جمله نوشت [۸]:

$$L = L_d + L_f + T_M \qquad (۱)$$

که در آن $L_d$ و $L_f$ افت‌های پراشی القایی گرمایی و غیر پراشی می‌باشند و $T_M$ درصد عبور آینه خروجی لیزر می‌باشد و $L_d$ را می‌توان به صورت زیر نوشت [۹]:

$$L_d = 1 - SR = 1 - \frac{\left| \int_0^{r_0} \exp\left( i\delta\varphi - \frac{r^2}{w_{l0}^2} \right) \right|^2}{\left| \int_0^{\infty} \exp\left( -\frac{r^2}{w_{l0}^2} \right) \right|^2} \qquad (۲)$$

که $r_0$ و $w_{l0}$ به ترتیب عرض بلور لیزری و شعاع باریکه لیزری در محیط بهره می‌باشند و $\delta\varphi$ جابجایی فازی القایی گرمایی به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\delta\varphi = -\frac{\pi D}{\lambda_l} r^2 + \frac{3\pi D}{2\lambda_l w_p^2} r^4 \qquad (۳)$$

در این رابطه D توان عدسی گرمایی بلور وانادیت، $w_p$ شعاع لکه پمپ و $\lambda_l$ طول موج لیزری می‌باشد. روابط مربوط به توان خروجی لیزر و توان در چرخش نیز به صورت زیر نوشته می‌شوند [۸]:

$$P_{out} = \eta_s \left( P_{in} - \frac{I_{sat}}{2\eta_p l_{Nd}} LV \right) \qquad (۴)$$

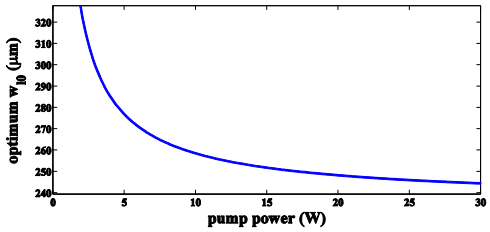
$$P_{circ} = \frac{1+R_M}{1-R_M} P_{out} \qquad (۵)$$

در این روابط $P_{in}$ توان پمپ، $I_{sat}$ شدت اشباع، $l_{Nd}$ طول بلور وانادیت، $R_M$ درصد بازتاب آینه خروجی و $\eta_s$ بازده شیب می‌باشند. وابستگی به سایر پارامترها را می‌توان در منابع مختلفی پیدا کرد. از آنجا که D و L به توان پمپ و $w_p$ وابسته هستند، می‌توان گفت توان خروجی تابعی از چهار پارامتر $w_{l0}$، $w_p$، $P_{in}$ و $T_M$ می‌باشد و باید همه این پارامترها بهینه شوند. در اینجا ما مقادیر $w_p$ و $T_M$ را ثابت و برابر با $\mu m$ ۳۰۰ و ۴۰٪ در نظر می‌گیریم. در شکل (۱) مقدار بهینه برای $w_{l0}$ به عنوان تابعی از توان دمشی برای یک بلور وانادیت $mm^3$ ۳*۳*۶ و درصد آلایندگی ۰/۵٪ رسم شده است. این مقدار بهینه با افزایش توان دمشی کاهش می‌یابد و به دلیل اثرات گرمایی قوی بلور وانادیت برای توان دمشی بزرگتر از ۲ وات از $w_p$ کمتر می‌شود.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

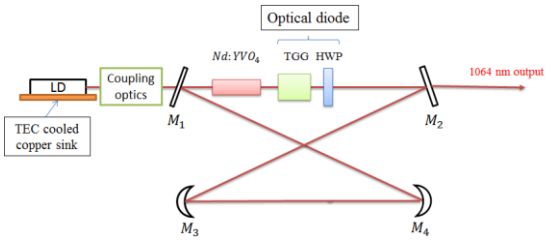
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]




شکل ۱:مقدار بهینه $W_{l0}$ به عنوان تابعی از توان دمشی

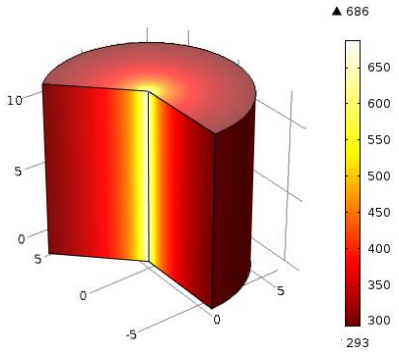
## ۳- چیدمان تجربی

با در نظر گرفتن این بهینه سازی، یک مشدد حلقوی کراواتی شکل وانادیت که در شکل (۲) نشان داده شده است طراحی شد. یک لیزر دیودی ۸۰۸ نانومتر با توان بیشینه ۴۰ وات و قطر فیبر ۲۰۰ میکرون به عنوان منبع دمش استفاده شده است و نور آن از طریق یک سیستم اپتیکی شامل چهار عدسی، بر روی بلور وانادیت متمرکز شده است. آینه $M_1$ اینه دمشی، آینه $M_2$ آینه خروجی می‌باشند و هر دو تخت می-باشند. آینه‌های $M_3$ و $M_4$ نیز آینه‌های بازتاب بالا در طول موج ۱۰۶۴ نانومتر می‌باشند و شعاع انحنای هر دو برابر با ۱۰۰ میلی متر می‌باشد. بلور TGG به همراه یک تیغه نیم موج نیز به عنوان دیود نوری در چیدمان قرار گرفته‌اند.

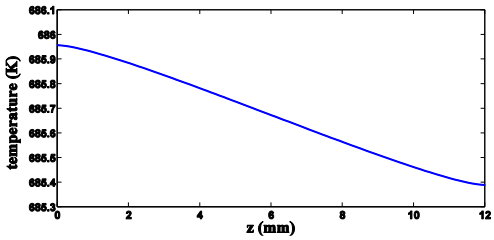



شکل ۲: شماتیک چیدمان لیزر وانادیت یک طرفه حلقوی. LD: لیزر دیودی، HWP: تیغه نیم موج، TEC: کولر ترموالکتریکی.

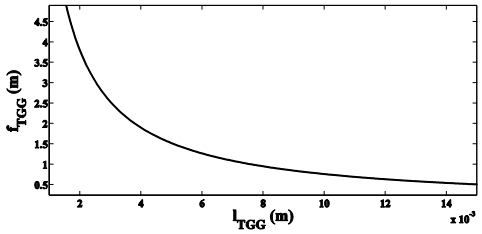
در این چیدمان ۳ بلور TGG استوانه‌ای شکل با شعاع یکسان و طول‌های ۶، ۸ و ۱۲ میلی متر بسیار نزدیک به بلور وانادیت قرار گرفته‌اند و در نتیجه می‌توان فرض کرد که شعاع لکه لیزری در طول آن ثابت می‌باشد. اعتقاد ما بر این است که اثرات گرمایی بلور TGG می‌تواند بر عملکرد لیزر تاثیر گذار باشد. بلور TGG در داخل یک میدان مغناطیسی دائمی قرار گرفته است و اطراف آن را یک سینک گرمایی مسی که توسط یک ترموالکتریک کولر کنترل دما می‌شود، احاطه کرده است. شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) به ترتیب یک نمونه از آنالیز گرمایی بلور TGG و فاصله کانونی عدسی گرمایی آن را بر حسب طول بلور نشان می‌دهد. کاملا مشخص است که با افزایش طول بلور، فاصله کانونی عدسی گرمایی کاهش می‌یابد.




شکل ۳: توزیع دمای سه بعدی در داخل بلور TGG




شکل ۴: توزیع دما در طول محور مرکزی بلور TGG



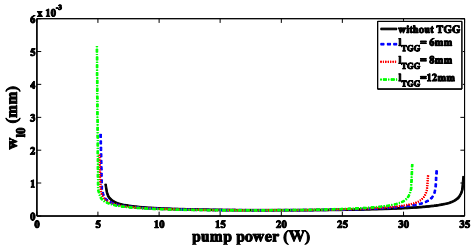

شکل ۵: فاصله کانونی عدسی گرمایی بلور TGG بر حسب طول بلور

در شکل (۶) مقدار $W_{l0}$ بر حسب توان پمپ در مشدد طراحی شده با و بدون در نظر گرفتن اثرات گرمایی بلور TGG رسم شده است. خارج شدن مشدد از حالت پایدار باعث رفتار مجانبی این نمودار شده است. در این شکل به منظور برقراری تطابق مد، طول بازوی $M_3M_4$ بدون در نظر گرفتن اثرات گرمایی بلور TGG برابر با ۹۰ میلی متر است و برای بلورهای ۶، ۸ و ۱۲ میلی‌متری مقادیری برابر با ۸۸، ۸۷ و ۸۴ میلی‌متر دارد. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش طول بلور TGG، توان آستانه لیزری تغییر زیادی نمی‌کند ولی بازه توانی پایایی لیزر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول بلور از ۶ میلی متر به ۱۲ میلی متر، توان پمپ بهینه مقادیری برابر با ۲۶/۵، ۲۶ و ۲۴/۹ وات دارد.



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]




شکل ۶: مقدار بهینه شعاع لکه لیزری در محیط بهره بر حسب توان دمشی با و بدون در نظر گرفتن اثرات گرمایی بلور TGG برای سه بلور متفاوت

به منظور تست این نتایج، سه بلور TGG به ترتیب در مشدد قرار گرفته‌اند. به منظور حفظ تقارن مشدد، هر دو آینه $M_3$ و $M_4$ روی استپر موتورهای یکسان با دقت ۵۰ میکرون قرار گرفته‌اند و به صورت همزمان حرکت داده شده‌اند. در هر بار حرکت، همراستایی مشدد در توان آستانه به منظور عملکرد $TEM_{00}$ چک می‌شود [۱۰]. این چرخه تا به دست آوردن بیشترین بازده ممکن ادامه می‌یابد. نتایج به دست آمده در جدول (۱) نشان داده شده است. نتایج تجربی کاملا با نتایج تئوری همخوانی خوبی را دارد. به عنوان مثال، برای بلور TGG با طول ۶ میلی متر، با کاهش طول بازوی $M_3M_4$ به اندازه ۲/۴ میلی‌متر توان خروجی برابر با ۵/۵ وات در توان دمشی ۲۷ وات به دست آمده است. برای توان‌های دمشی بیشتر یا حرکت بیشتر آینه‌ها بازده لیزر کاهش یافته است.

جدول ۱ : نتایج تجربی (ستون‌های هاشور خورده) و تئوری (ستون‌های سفید) به دست آمده از لیزر

| $l_{TGG}$ (mm) | $M_3M_4$ (mm) | $M_3M_4$ (mm) | $P_{opt}$ (W) | $P_{opt}$ (W) | $P_{out}$ (W) | $P_{out}$ (W) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6±0.1 | 88 | 87.6±0.1 | 26.5 | 27±0.1 | 5.6 | 5.5±0.05 |
| 8±0.1 | 87 | 86.6±0.1 | 26 | 26.4±0.1 | 5.6 | 5.45±0.05 |
| 12±0.1 | 84 | 84.4±0.1 | 24.9 | 25.3±0.1 | 5.6 | 5.35±0.05 |

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر طول بلور TGG بر بهینه سازی و عملکرد یک لیزر دمش از انتهای یک طرفه وانادیت مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با در نظر گرفتن افت ناشی از پراش القایی گرمایی، شعاع لکه لیزری بهینه در محیط بهره محاسبه شد. سپس با در نظر گرفتن این بهینه سازی و اثرات گرمایی بلور TGG، برای طول‌های متفاوت بلور TGG، مشدد مناسب طراحی شد و مشخص شد که با تغییر طول بلور، اگرچه توان آستانه تغییر قابل توجهی نمی‌کند ولی محدوده پایایی و در نتیجه توان دمشی بهینه با افزایش طول بلور کاهش می‌یابد.

سپس با برپایی چیدمان تجربی و قرار دادن سه طول متفاوت از بلور TGG در داخل آن، این نتایج به صورت تجربی نیز به دست امد که مطابقت خوبی را با نتایج تئوری از خود نشان داد. در انتها برای هر سه طول بلور، خروجی در حدود ۵/۵ وات با بازدهی در حدود ۲۰ ٪ به دست آمد. به طور خلاصه می‌توان گفت طول بلور TGG تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد اینچنین لیزری دارد و برای هر طول از این بلور، می‌بایست طراحی متناسب با آن صورت گیرد.

## مراجع


[1] Svelto, Orazio, *Principles of lasers*, New York, Rheine: Heyden, 1976.

[2] Li, X., Pan, Q., Jing, J., Xie, C., and Peng, K., "LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd: YAP-KTP laser with 1.1 W output at 540 nm", opt. comm., Vol. 201, No. 6, pp. 165-171, 2002.

[3] Jalali, A. A., Rybarsyk, J., and Rogers, E., "Thermal lensing analysis of TGG and its effect on beam quality", Opt. exp. Vol. 21, No. 11, pp. 13741-13747, 2013.

[4] 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).

[5] Xiong, Z., Li, Z. G., Moore, N., Huang, W. L., and Lim, G. C., "Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd : $YVO_4$ lasers." IEEE journal of quantum electronics, Vol. 39, No. 8, pp. 979-986, 2003.

[6] Sabaeian, M., Nadgaran, H., and Mousave, L., "Analytical solution of the heat equation n a longitudinally pumped cubic solid-state laser." Appl.opt., Vol. 47, No. 13, pp. 2317-2325, 2008.

[7] Chen, Y. F., Kao, C. F., Huang, T. M., Wang, C. L., and Wang, S. C., "Inuence of thermal effect on output power optimization in _ber-coupled laser-diode end-pumped lasers",IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics V0l. 3, No. 1, pp. 29-34, 1997.

[8] Siegman, *Lasers*, University science books, Mill valley, CA, 1986.

[9] Peng, X., Xu, L., and Asundi, A., "Power scaling of diode-pumped Nd : $YVO_4$ lasers." IEEE journal of quantum electronics Vol. 38, No. 9, pp. 1291-1299, 2002.




این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30 ]