بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

بهبود کیفیت پرتو و بازده لیزر دیسک نازک Yb:YAG با استفاده از دمش خط- فونون- صفر

محمد آقایی، شهرام کاظمی، سعید رادمرد، مهدی بختیاری

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران، aghaie@inlc.ir

در این گزارش براساس نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی، به بررسی اثر تغییر طول موج دمش لیزر دیسک نازک Yb:YAG از ۹۴۰ نانومتر به خط-فونون-صفر (۹۶۹ نانومتر) پرداخته شده است. برای این منظور توان خروجی لیزر، دمای دیسک و مقدار توان جذب نشده از باریکه دمش، محاسبه و اندازه‌گیری شده است. همچنین برای تخمین میزان بهبود کیفیت پرتو در طراحی تشدیدگر، مقدار تغییرات دیوپتر دیسک در بازه توان دمش اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج تجربی نشان می‌دهد که تغییر طول موج دمش منجر به افزایش ٪۱۴,۵ در بازده لیزر، کاهش ٪۲۸,۶ در دمای دیسک و همچنین کاهش ٪۱۴,۸ در مقدار توان جذب نشده از باریکه دمش (در حالت ۸بار عبور باریکه دمش از دیسک)می‌شود. با کاهش مقادیر اندازه‌گیری شده از تغییرات دیوپتر دیسک، کیفیت پرتوی لیزر در طراحی تشدیدگر نیز ٪۳۸,۴ بهبود می‌یابد.

کلید واژه- لیزر دیسک نازک، Yb:YAG، کیفیت باریکه، دمش خط-فونون-صفر، طراحی تشدیدگر

Improvement of beam quality and laser efficiency of Yb:YAG thin disk laser by use of zero-phonon-line pumping

Mohammad Aghaie, Shahram Kazemi, Saeid Radmard, Mahdi Bakhtiyari

Iranian National Center for Laser Science and Technology, P.O. Box 14665-576, Tehran, Iran

In this report, we studied on the effect of change of **the** pump wavelength from 940 nm pumping to zero-phonon-line (969 nm) pumping base on numerical and experimental results. We calculated and measured output power laser, disk temperature and the value of the unabsorbed pump power. Also, we measured dioptric power variation of disk to estimate improvement of the laser beam quality in resonator design. The comparison of the results show increasing in laser efficiency about 14.5%, decreasing of the disk temperature about 28.6% and decreasing of the unabsorbed pump power about 14.8% (by use of 8pass module). Due to decreasing in dioptric power variation of thin disk it shows improvement of laser beam quality about 28% in resonator design.

Keywords: Thin disk laser, Yb:YAG, beam quality, zero-phonon-line pumping, resonator design

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

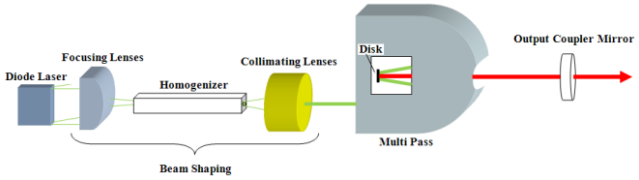
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

۱- مقدمه

لیزر دیسک نازک Yb:YAG به خاطر تولید باریکه لیزر با توان بالا و کیفیت پرتوی خوب، در میان محققین حوزه لیزرهای حالت جامد جایگاه ویژه‌ای پیدا نموده است، بطوریکه تلاش‌های مستمری برای ثبت رکورد از نظر توان خروجی لیزر و همچنین بهبود کیفیت پرتو صورت گرفته است [۱]. در این حوزه یکی از چالش‌های اساسی و در پیش روی محققین لیزرهای حالت جامد، خارج کردن گرمای تولید شده از داخل محیط فعال لیزری (افزایش خنکسازی) می‌باشد که به هندسه محیط فعال و درنتیجه به هندسه خنکسازی مورد استفاده بستگی دارد. پیشنهاد هندسه دیسک شکل برای محیط فعال لیزرهای حالت جامد [۲]، به دلیل بزرگ بودن نسبت سطح به حجم محیط فعال، سبب افزایش میزان خنکسازی و امکان کاهش اثرات حرارتی شده است. علاوه بر انتخاب مناسب برای شکل هندسی محیط فعال، می‌توان با انتخاب مناسب طول موج دمش، گرمای تولید شده در محیط فعال را کاهش داد که با به کار بردن دمش خط-فونون-صفر (طول موج دمش ۹۶۹ نانومتر) به جای طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر این امر محقق خواهد شد، بطوریکه در گسیل لیزر ۱۰۳۰ نانومتر، نقص کوانتومی از مقدار ٪۸,۷۴ در طول موج ۹۴۰ نانومتر به مقدار ٪۵,۹۲ در دمش خط-فونون-صفر کاهش می‌یابد، از اینرو با تغییر طول موج دمش، گرمای تولید شده در داخل محیط فعال حدود ٪۳۲ کاهش می‌یابد که دلیل این امر حذف گذار فونونی از تراز دمش به تراز بالای لیزر در مقایسه با طول موج دمش ۹۴۰نانومتر است. نامگذاری خط- فونون- صفر نیز به این دلیل است که در دمش محیط فعال Yb:YAG با طول موج ۹۶۹ نانومتر، گذار فونونی در منیفلد بالا به صفر می‌رسد و دمش به طور مستقیم به تراز بالای لیزر صورت می‌گیرد [۳و۴]. در اینجا نتایج تغییر دمش از ۹۴۰ نانومتر به خط-فونون-صفر به طور عددی و تجربی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته شده است.

۲- چیدمان آزمایشگاهی

شکل (۱) نمایش شماتیکی از چیدمان آزمایشگاهی لیزر دیسک نازک را نشان می‌دهد، بطوریکه متشکل از لیزر دیودها به عنوان منبع دمش، چیدمان شکل‌دهی پرتو و چیدمان تشدیدگر است. در این آزمایش بلور دیسک نازک تا توان ۲۳۱۰ وات در هر یک از طول موج‌های دمش ۹۴۰ نانومتر و ۹۶۹ نانومتر دمیده شده است.



شکل ۱- نمایش شماتیک از چیدمان لیزر دیسک نازک.

برای شکل‌دهی توان خروجی لیزر دیودهای دمش و تبدیل آن به باریکه‌ای با سطح مقطع دایره‌ای و با توزیع شدت یکنواخت، از چیدمان شکل‌دهی پرتو شامل میله هموژنایزر، لنزهای استوانه‌ای و کروی استفاده شده است. همچنین برای افزایش جذب توان دمش، از سامانه دمش ۱۶ بار عبوری استفاده شده است. برای اندازه‌گیری میزان کاهش توان دمش برگشتی در اثر تغییر طول موج دمش، از سامانه دمش ۸ بار عبوری استفاده شده است. محیط فعال Yb:YAG دارای آلاییدگی ٪۹ و با ضخامت ۲۰۰ میکرون و قطر ۱۸ میلیمتر است که بر روی گرما-چاه مس-تنگستن چسبانده شده است. قطر لکه دمش بر روی دیسک برابر با ۸,۲ میلیمتر متناسب با آستانه آسیب-پذیری دیسک در نظر گرفته شده است. تشدیدگر خطی چند-مدی با بازتابندگی آینه خروجی برابر با ٪۹۷ و شعاع انحنای ۱ متر طراحی شده است. برای پیش بینی نتایج تجربی، شبیه‌سازی عددی نیز انجام شده است بطوریکه که در آن رفتار وابسته به دمای محیط فعال Yb:YAG در جذب و در کارایی لیزر منظور گردیده است. [۵] .

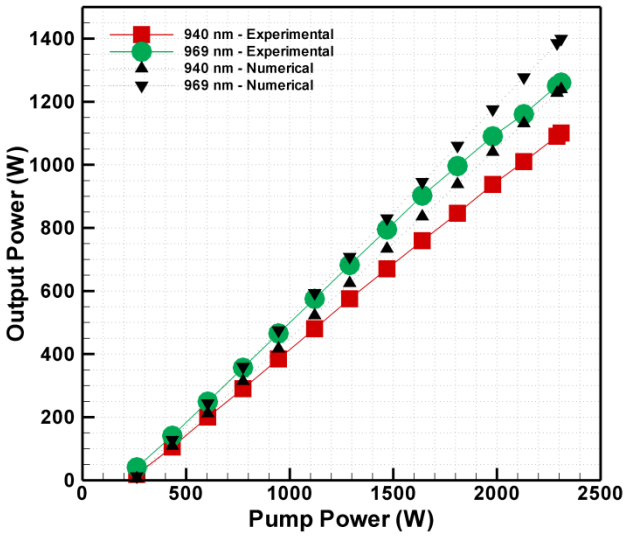
۳- بحث و بررسی نتایج

در شکل ۲ نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای توان خروجی لیزر نشان داده شده است. در طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر، توان خروجی لیزر برابر با ۱۱۰۰ وات و

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

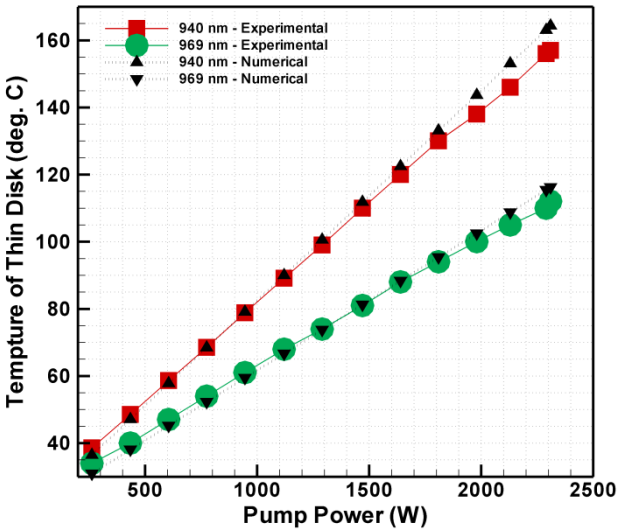
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

همچنین در طول موج دمش ۹۶۹ نانومتر توان خروجی لیزر برابر با ۱۲۶۰ وات در ماکزیمم توان دمش بدست آمده است که بیانگر افزایش بازده لیزر از ٪۴۷,۶ به ٪۵۴,۵ در مقایسه با یکدیگر است.

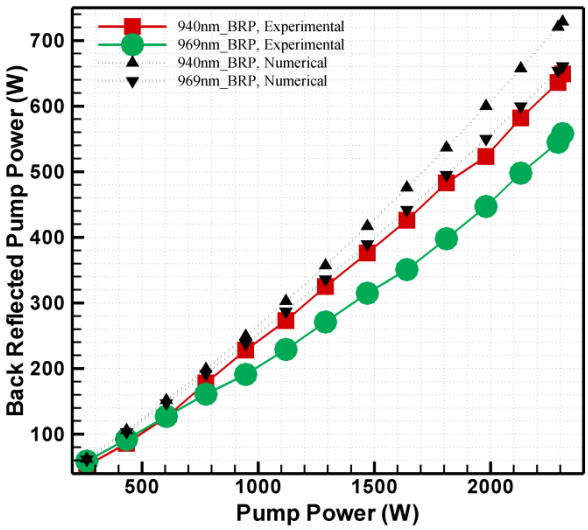


شکل۲- منحنی توان خروجی لیزر بر حسب توان دمش.

شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری دمای سطح بلور دیسک نازک برای هر دو طول موج دمش در توان‌های دمش مختلف را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که دمای بلور در ماکزیمم توان دمش در طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر از ۱۵۷ درجه سانتیگراد به ۱۱۲ درجه سانتیگراد در طول موج دمش ۹۶۹ نانومتر کاهش یافته است که کاهش ۲۸,۶ درصدی در اثر تغییر طول موج دمش را نشان می‌دهد. اختلاف جزئی میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی که در شکل ۳ قابل مشاهده است در حدود ۴ درصد است که می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری و همچنین تفاوت بسیار جزئی در مقادیر اولیه استفاده شده در شبیه‌سازی نسبت به مقدار واقعی آن باشد. از آنجا که خواص محیط فعال Yb:YAG وابسته به دما است لذا کاهش دمای دیسک سبب افزایش جذب توان دمش و در نتیجه افزایش بازده لیزر می‌شود که در شکل ۲ قابل مشاهده است. از سوی دیگر، با کاهش یافتن دمای بلور، امکان کاهش قطر لکه دمش و درنتیجه امکان افزایش چگالی توان دمش فراهم می‌گردد و این موضوع نیز منجر به افزایش توان خروجی و بازده لیزر می‌گردد. علاوه بر این، کاهش قطر لکه دمش نیز سبب جلوگیری از نوسان مدهای مرتبه بالاتر تشدیدگر شده و همپوشانی بین لکه دمش و مد پایه تشدیدگر نیز افزایش می‌یابد [۶]..



شکل۳- منحنی دمای بلور دیسک نازک بر حسب توان دمش



شکل۴- منحنی توان برگشتی دمش با حضور سامانه دمش ۸ بار عبور.

شکل ۴ منحنی نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به مقدار توان جذب نشده از توان دمش در محیط فعال را نشان می‌دهد. برای فراهم نمودن امکان ثبت نتایج تجربی از سامانه ۸ بار عبوری به جای ۱۶ بار عبوری استفاده شد و اختلاف قابل مشاهده میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی در شکل ۴ بدین خاطر است که به دلیل تفاوت در ابعاد آینه-های سامانه ۸ بار عبوری نسبت به سامانه ۱۶ بار عبوری، دسترسی به آینه‌های با لایه‌نشانی استاندارد نبود و با افزایش توان دمش آینه‌ها گرم شده و ضریب بازتابش آنها

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]

تغییر می‌کرد در حالیکه در شبیه‌سازی مقدار ضریب بازتابش آینه‌ها ثابت و برابر با ۹۹,۹۸ درصد در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود مقدار توان دمش جذب نشده در طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر از ۶۴۹ وات به ۵۵۸ وات در طول موج دمش ۹۶۹ نانومتر کاهش یافته است که در نتیجه سبب افزایش بازده لیزر می‌گردد. تحت این شرایط مقدار توان برگشتی (مقدار توان دمش جذب نشده از باریکه دمش در محیط فعال) نیز کاهش می‌یابد که کاهش آن در سامانه دمش ۱۶ عبوری قابل ملاحظه‌تر خواهد بود و سبب خواهد شد که اثرات مخرب توان برگشتی بر روی منابع دمش نیز کاهش یابد. با توجه به[۶]، رابطه کیفیت پرتو لیزر در تشدیدگر پایدار دینامیکی ($M^2_{dyn.stable}$) با پهنای ناحیه پایداری تشدیدگر (ΔD_{res})، در چیدمان‌های تشدیدگر با دیسک در انتها و دیسک در میانه تشدیدگر به صورت زیر بدست می‌آید،

$$^{end}M^2_{dyn.stable}=\frac{(aR_p)^2\pi}{4\lambda}|\Delta D_{res}| \qquad (۱)$$

$$^{fold}M^2_{dyn.stable}=\frac{(aR_p)^2\pi}{2\lambda}|\Delta D_{res}| \qquad (۲)$$

بطوریکه $\Delta D_{res}\geq 2\Delta D_{th}$ است. ΔD_{th} بازه تغییرات دیوپتر دیسک، a ضریب همپوشانی بین مد لیزر و لکه دمش بر روی دیسک و R_p شعاع لکه دمش بر روی دیسک می‌باشد. با توجه به روابط (۱) و (۲) قابل مشاهده است که امکان طراحی تشدیدگر پایدار با کیفیت باریکه خوب به مقدار ΔD_{th}، در بازه تغییرات توان دمش، بستگی دارد. برای اندازه‌گیری مقدار ΔD_{th} از سنسور شاک – هارتمن در چیدمان اندازه‌گیری شعاع انحنای دیسک استفاده شده است و مقدار $\Delta D_{th}=0.152m^{-1}$ در طول موج دمش ۹۶۹ نانومتر و مقدار $\Delta D_{th}=0.247m^{-1}$ در طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر بدست آمد. برای مثال، طبق رابطه (۱) و مقادیر اندازه‌گیری شده برای ΔD_{th}، می‌توان مشاهده کرد که در طراحی رزوناتور پایدار دینامیکی در حالت دیسک در انتها، مقدار کیفیت پرتو برای طول موج دمش ۹۴۰ نانومتر و ۹۶۹ نانومتر به ترتیب برابر با ۶,۳ و ۳,۹ قابل حصول می‌باشد که حدود ٪۳۸,۱ بهبود حاصل شده است.

۴- نتیجه‌گیری

یک مقایسه کمی برای عملکرد لیزر دیسک نازک Yb:YAG موج پیوسته توان بالا تحت طول موج‌های دمش ۹۴۰ نانومتر و دمش خط-فونون-صفر بر اساس نتایج شبیه‌سازی و تجربی ارائه گردید. توان خروجی لیزر، دمای سطح دیسک و توان دمش برگشتی تحت هر دو طول موج دمش اندازگیری شده است. در این آزمایش افزایش ٪۱۵,۴ در بازده نوری لیزر و کاهش ٪۱۴,۸ در توان دمش بازگشتی مشاهده شد. دمای سطح بلور دیسک نازک از ۱۵۷ درجه سانتیگراد به ۱۱۲ درجه سانتیگراد کاهش یافت که کاهش ٪۲۸,۶ را نشان می‌دهد. همچنین بهبود ٪۳۸,۱ برای کیفیت پرتو لیزر در طراحی تشدیدگر پایدار دینامیکی با دیسک در انتها نیز مشاهده شد.

مرجع‌ها

[1] Adolf Giesen, Jochen Speiser, Fifteen Years of Work on Thin-Disk Lasers: Results and Scaling Laws, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 13 (3), (2007).

[2] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, H. Opower, "Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers," Appl. Phys. B, 58(5), 365-372(1994).

[3] W. Birgit, V. Andreas, A.A. Marwan, G. Thomas, 'Enhanced performance of thin-disk lasers by pumping into the zero-phonon-line', Optics letters, 37(15), 3045-3047 (2012).

[4] M. Smrž, T. Miura, M. Chyla, S. Nagisetty, O.Novák, A. Endo, T. Mocek1,' Suppression of nonlinear phonon relaxation in Yb:YAG thin disk via zero-phonon-line pumping', Optics letters, 39(16), 4919-4922 (2014).

[5] .Radmard,S.A.,M.Shayganmanesh, "Optimization of Yb:YAG thin disk laser design parameters considering the pumping light back reflection", Optics & Laser Technology, 63, 148–153(2014).

[6] S. Arabgari, M. Aghaie, S. Radmard, S. H. Nabavi, "Thin disk laser resonator design: The dioptric power variation of thin disk and the beam quality," Optik 185, 868-874 (2019).

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-21]