بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ 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

توان خروجی از لیزر دیسکی نازک با توزیع پمپاژ حلقوی

رضا آقبلاغی[۱]، حبیب صاحب قران چره‌جلو و رباب زادجمال سیفی

[۱]گروه فوتونیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه بناب

چکیده - در این مقاله توان خروجی از یک لیزر دیسکی نازک با توزیع پمپاژ حلقوی مطالعه شده است. این توزیع برای تولید باریکه غیرپراشی بسل – گاوسی و باریکه‌های با قطبش شعاعی مناسب است. بنابراین، با حل معادلات نرخ سیستم شبه سه ترازی آلاییدهٔ *Yb: YAG* توان خروجی لیزر دیسکی نازک تخمین زده شده است.

کلیدواژه- لیزر دیسک نازک، معادلات نرخ Yb:YAG، توزیع پمپاژ حلقوی

Output power of thin-disk laser with ring-shaped pumping distributions

R. Aghbolaghi[1*], H. Sahebghoran Chareh jaloo and R. Zadjamal Seifi
[1] Photonics group, Faculty of basic science, University of Bonab
(*r.aghbolaghi@gmail.com)

Abstract- In this paper, the output power of a thin-disk laser has been investigated with a ring-shaped pumping distribution. It is useful to produce non-diffracting Bessel-Gaussian beams and radially polarized beams. The output power has been estimated by solving the rate equations of a quasi-three -levels Yb doped material.

Keywords: Thin Disk Laser, rate equations Yb: YAG, Ring-shaped pumping distribution

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

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

۱- مقدمه

در سال ۱۹۸۵ دسته‌ای جدیدی از باریکه‌ها معرفی شدند که دارای شکلی حلقوی بوده و شدت‌هایشان هم در مرکز باریکه و هم در نواحی بیرون از حلقه ناپدید می‌شدند. این نوع باریکه‌ها دارای تکانه‌ی زاویه‌ای اوربیتال اصلی هستند [۱]. از جمله مزیت‌های این نوع باریکه‌ها غیرپراشی بودن آنها است که در گیراندازی ذرات زیراتمی و هدایت اتم‌های سرد کاربرد بسیاری دارند[۲،۳]. بصورت تجربی چنین باریکه‌هایی را می‌توان با موجبرهای نوری چند مدی، صفحات فازی حلزونی، فیبرهای چندمدی تولید کرد [۴]. از لحاظ تئوری با حل معادله‌ی موج پیرامحوری در مختصات استوانه‌ای حلقوی به جواب‌هایی می‌رسیم که باریکه‌های حلقوی را توصیف می‌کنند که مهمترین آنها باریکه‌های لاگرگاوسی و بسل‌گاوسی مرتبه بالا هستند.

لیزرهای دیسکی نازک برای اولین بار در سال ۱۹۹۴ معرفی شدند، از مزایای این نوع لیزرها می‌توان به توان بالا و کیفیت خوب اشاره کرد [۵]. رزوناتور بر پایه اکسیکون، برای اولین بار توسط روگل سالازارو و همکارانش و همزمان با آنها توسط خیلوو و همکارانش برای تولید باریکه‌های بسل پیشنهاد شد [۶و۷]. ما این رزوناتور را برای اولین بار در لیزرهای دیسکی نازک بکار گرفتیم [۸]. باتوجه به اینکه افزایش دما در مرکز دیسک باعث آسیب به آن می‌شود بنابراین نیاز به کاهش دمای مرکز دیسک وجود دارد. علاوه بر مزایای ذکر شده، از مزایای اصلی باریکه‌های حلقوی می‌توان به کاهش افزایش دمایی روی سطح دیسک اشاره کرد که در این‌صورت می‌توان به توان‌های خروجی بالا دست یافت [۹].

در این مقاله با در نظر گرفتن پیکربندی رزوناتور لیزر دیسکی نازک بر پایه اکسیکون، ابتدا روابط و شکل‌های سه بعدی مربوط به باریکه‌های حلقوی از جمله باریکه‌های گاوسی، لاگر-گاوس و بسل گاوس بیان شده است، سپس معادلات نرخ سیستم شبه سه ترازی Yb: YAG آورده شده است. در ادامه نمودارهای نسبت توان خروجی به توان ورودی با در نظر کردن توزیع شدت‌های ورودی بسل-گاوسی، گاوسی و قطبیدهٔ شعاعی رسم شده است و در نهایت این نمودارها باهم مقایسه شده‌اند.

۲- معادلات ریاضی

۲-۱- باریکه‌های حلقوی

یکی از مهمترین جواب‌های معادله‌ی موج، باریکه‌ی گاوسی می‌باشد. توان باریکه اساسا به‌صورت یک استوانه‌ی کوچک پیرامون محور متمرکز شده است. مد پایه لیزر، باریکه‌ی گاوسی می‌باشد. معادله‌ی باریکه‌ی گوسی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$U_{Gauss}(r)=A_{\circ}\frac{\omega_{\circ}}{\omega(z)}\exp\left[-\frac{r^{2}}{\omega^{2}(z)}\right]\exp\left[-ikz-\frac{ikr^{2}}{2R(z)}+i\,\xi(z)\right] \quad (1)$$

که در آن $\omega(z)=\omega_{\circ}\sqrt{1+\left(z/z_{\circ}\right)^{2}}$ اندازه پهنای باریکه، $R(z)=z\left[1+\left(z_{\circ}/z\right)^{2}\right]$ شعاع انحنای جبهه موج، $\xi(z)=\tan^{-1}\left(z/z_{\circ}\right)$ و $z_{\circ}=\pi\omega_{\circ}^{2}/\lambda$ اندازه رایلی پارامترهای باریکهٔ گاوسی هستند (شکل۲). یکی از جواب-های معادله موج باریکه لاگر-گاوسی است. می‌توان با ترکیب دو مد لاگرگاوسی قطبیده خطی متعامد TEM_{01x} و TEM_{01y}

$$\begin{aligned} TEM_{01x}(r,\theta)&=E_{\circ}\sqrt{2}\frac{r}{\omega}\exp\left(\frac{-r^{2}}{2\omega^{2}}\right)\cos(\theta)\\ TEM_{01y}(r,\theta)&=E_{\circ}\sqrt{2}\frac{r}{\omega}\exp\left(\frac{-r^{2}}{2\omega^{2}}\right)\sin(\theta)\end{aligned} \quad (2)$$

باریکهٔ قطبیدهٔ شعاعی یا مماسی تولید کرد [۱۰]:

$$\begin{aligned} U_{(r)}&=\hat{x}TEM_{01x}(r,\theta)+\hat{y}TEM_{01y}(r,\theta)\\ &=\hat{r}E_{\circ}\sqrt{2}\frac{r}{\omega}\exp\left(\frac{-r^{2}}{2\omega^{2}}\right)\\ U_{(\theta)}&=\hat{y}TEM_{01x}(r,\theta)-\hat{x}TEM_{01y}(r,\theta)\\ &=\hat{\theta}E_{\circ}\sqrt{2}\frac{r}{\omega}\exp\left(\frac{-r^{2}}{2\omega^{2}}\right)\end{aligned} \quad (3)$$

که بترتیب $U_{(r)}$ و $U_{(\theta)}$ باریکهٔ قطبیدهٔ شعاعی و مماسی هستند و در شکل۳ پروفایل عرضی شدت باریکهٔ قطبیدهٔ شعاعی رسم شده است. یکی دیگر از جواب‌ها باریکه بسل است (شکل۴) که با معادله زیر مشخص می‌شود:

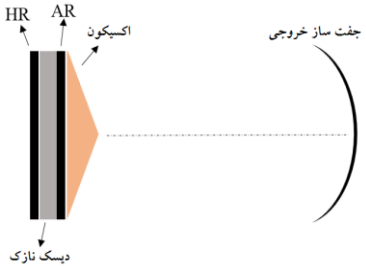
$$U(r)=A_{m}J_{m}(k_{t}r)e^{im\phi-i\beta z} \quad (4)$$

که J_{m} تابع بسل از مرتبه m می‌باشد و $k_{t}=k\sin\theta_{\circ}$ عدد موج عرضی است [۱۱]. پیکربندی رزوناتور لیزر دیسک نازک برپایه اکسیکون در شکل ۱ نمایش داده شده است که HR و AR بترتیب رویه‌های بازتابنده کامل و عبوردهندهٔ کامل

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

برای طول‌موج‌های لیزر و پمپاژ هستند. در این رزوناتور از سیستم پمپاژ ارایه شده در [۹] استفاده شده است.



شکل ۱: پیکربندی رزوناتور لیزر دیسک نازک

جدول ۱ : مشخصه‌های اسپکتروسکوپی *Yb: YAG*

σ_p	۷/۶×۱۰$^{-۲۱}$	α_0	۱۰/۹۷ cm^{-1}
N_t	۱۳/۸×۱۰^{۲۰}	f_{l1}	۰/۸۷۶
$h\nu_p$	۲/۱۳×۱۰$^{-۱۹}$	f_{u2}	۰/۱۸۵
τ_u	۹۶۰μs	C_{Yb}	٪۱۰

۲-۲- معادلات نرخ

برای محاسبات، مدل دیاگرام ترازهای انرژی برای یون آلاییده یتربیوم در نظر گرفته می‌شود. فقط دو تا از تعداد زیاد، l و u ، در فرآیند جذب و تقویت درگیر هستند. تراکم جمعیت با $N_{Yb} = N_l + N_p$ نمایش داده می‌شود. بنابرین وارونی جمعیت برابر است با

$$\Delta N_p = f_{l1}N_l - f_{u2}N_u = N_{Yb}(f_{l1}+f_{u2})(\frac{f_{l1}}{f_{l1}+f_{u2}} - \frac{N_u}{N_{Yb}}),$$
$$\Delta N_l = f_{u1}N_u - f_{l2}N_l = N_{Yb}(f_{l2}+f_{u1})(\frac{N_u}{N_{Yb}} - \frac{f_{l2}}{f_{l2}+f_{u1}}),$$
(۵)

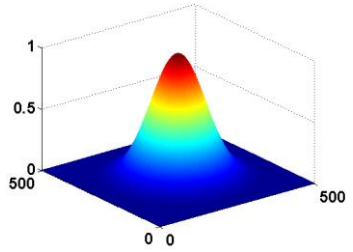
با استفاده از نمادسازی، معادلات نرخ را برای تراز بالا در لیزر پیوسته می‌توان بیان کرد، چنانکه

$$\frac{dN_u}{dt} = \sigma_p c\Phi_p \Delta N_p - \frac{N_u}{\tau_u} - \sigma_l c\Phi_l \Delta N_l = 0, \qquad (۶)$$

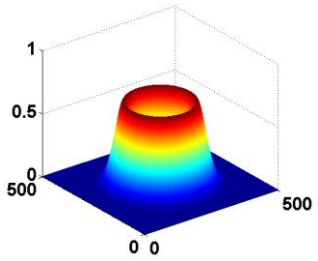
که $\Phi_k (k=l,p)$ چگالی فوتون برای امواج پمپاژ و لیزر می‌باشد و X_u به صورت زیر است:

$$X_u(z) = \frac{f_p I_p(z) + f_l I_l(z)}{1 + I_p(z) + I_l(z)}, \qquad (۷)$$

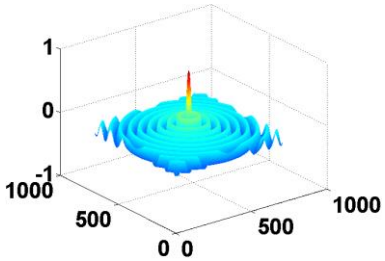
که I_p و I_l به ترتیب مجموع شدت پمپاژ نرمالیزه شده و مجموع شدت لیزر نرمالیزه شده هستند [۱۲].



شکل ۲: نمودار سه بعدی توزیع شدت باریکه گاوسی



شکل ۳: نمودار سه بعدی توزیع شدت مد قطبیدهٔ شعاعی.



شکل ۴: نمودار سه بعدی توزیع شدت باریکه بسل – گاوسی

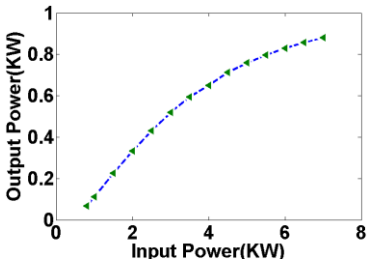
۳- بحث و نتایج

در این بخش نمودارهای نسبت توان ورودی به توان خروجی آورده شده است (شکل‌های ۵-۷). همانطور که از نمودار مربوط به نسبت توان ورودی به توان خروجی باریکه گاوسی (شکل۵) مشخص است، با افزایش توان ورودی، توان خروجی افزایش یافته است. همچنین با توجه به توزیع سه بعدی شدت (شکل۲)، توزیع شدت در مرکز دارای پیک تندی بوده و در لبه‌ها به تدریج به کمترین مقدار خود می‌رسد که این موجب عدم پوشش کامل سطح محیط فعال می‌شود. در

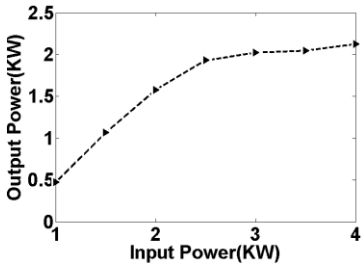
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]

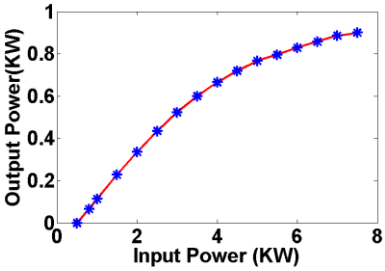
شکل ۶ با افزایش توان ورودی، توان خروجی با توزیع شدت حلقوی بسل گاوسی افزایش یافته است. از شکل ۴ واضح است که یک پیک تند در مرکز باریکه وجود دارد ولی در بقیه نواحی توزیع شدت دارای یکنواختی بوده و به میزان یکسان سطح محیط فعال پوشش داده می‌شود. در باریکه قطبیدهٔ شعاعی توان خروجی با افزایش توان ورودی نیز افزایش یافته است (شکل۷) و توزیع شدت این باریکه پیرامون مرکز دارای بیشترین مقدار است ولی این مقدار در مرکز باریکه کاهش یافته و به کمترین مقدار رسیده است (شکل۳). کم بودن تلفات باریکهٔ بسل-گاوسی بدلیل ویژه مد بودن آن موجب می‌شود که توان خروجی نسبت به این توزیع شدت بیشتر از سایر توزیع شدت‌ها باشد چراکه تلفات باریکه‌های قطبیدهٔ شعاعی و گاوسی زیاد است و در نتیجه توان خروجی ناشی از شدت آنها پایین‌تر است.



شکل۵ : نسبت توان ورودی به توان خروجی با باریکه گاوسی



شکل۶ : نسبت توان ورودی به توان خروجی باریکه بسل-گاوسی



شکل۷ : نسبت توان ورودی به توان خروجی باریکه با قطبیده شعاعی

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که توان خروجی متناسب با نوع شدت ورودی به محیط فعال تغییر می‌کند و این پیکربندی با شدت ورودی باریکه بسل-گاوسی دارای بیشترین توان خروجی نسبت به سایر توزیع‌های شدت است و این بخوبی نشان می‌دهد که باریکهٔ بسل-گاوسی توزیع شدت یکنواخت‌تری نسبت به سایر توزیع‌ها داشته و می‌تواند سطح محیط فعال را بیشتر پوشش داده و توان خروجی با این توزیع شدت نسبت به بقیه توزیع شدت‌ها بیشتر باشد.

مراجع

[1] V.I. Kruglov, R.A. Vlasov, “Spiral self-trapping propagation of optical beams in media with cubic nonlinearity”, Phys. Let. A, Volume 111, Issues 8–9, 401-404, 1985.

[2] M. S. Soskin and M. Vasnetsov,*Progress in optics*,. Opt,Vol. 42.pp. 219-276, 2001.

[3] Zhangrong Mei and Olga Korotkova, "Random sources generating ring-shaped beams," Opt. Lett. **38**, 91-93, 2013.

[4] Salla Gangi Reddy, Ashok Kumar, Shashi Prabhakar, and R. P. Singh, "Experimental generation of ring-shaped beams with random sources," Opt. Lett. **38**, 4441-4444, 2013.

[5] A. Giesen and J. Speiser, “Fifteen years of work on thin-disk lasers: results and scaling laws”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 13 (3), pp. 598, 2007.

[6] J. Rogel-Salazar, G. H. C. New, and S. Chávez-Cerda,“Bessel–Gauss beam optical resonator,” Opt. Commun.190.,pp.117–122, 2001.

[7] A. N. Khilo, E. G. Katranji, and A. A. Ryzhevich, “Axiconbased Bessel resonator: analytical description and experiment,” J. Opt. Soc. Am. A 18., pp.1986–1992, 2001.

[8] R. Aghbolaghi, S. Batebi, and J. Sabaghzadeh, "Thin-disk laser with Bessel-like output beam: theory and simulations,"Opt. 52, pp. 683-689, 2013.

[9] Tom Dietrich, Martin Rumpel, Thomas Graf, and Marwan Abdou Ahmed, "Investigations on ring-shaped pumping distributions for the generation of beams with radial polarization in an Yb:YAG thin-disk laser," Opt. Express **23**, 26651-26659, 2015.

[10] Reza Aghbolaghi and Habib Sahebghoran Charehjolo, "Radially and azimuthally polarized laser beams by thin-disk laser," Appl. Opt. **55**, 3510-3517, 2016

[11] Bahaa E.A.Saleh, Malvin Carl Teich, *Fundamentals of Photonic* ,1991.

[12] Gilbert L. Bourdet, "Theoretical investigation of quasi -three-level longitudinally pumped continuous wave lasers, " opt.Vol. 39, No. 6, 2000.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-13]