بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

خروجی باریکه‌ی حلقوی-شکل در تشدیدگر V-شکل بر پایه لنز مخروطی

رضا آقبلاغی، حبیب صاحب‌قران چره‌جلو و وحید فلاحی

گروه فوتونیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بناب، بناب

r.aghbolaghi@gmail.com ، h.sahebghoran@ymail.com ،v.fallahi@bonabu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، با بکارگیری یک لنز مخروطی در تشدیدگر V-شکل لیزر دیسکی نازک، تولید باریکه‌ی خروجی حلقوی-شکل شبیه سازی شده است. همچنین، مد غالب تشدیدگر با استفاده از انتگرال کولینز به همراه روش تکرار فکس-لی استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که فاصله‌ی آینه‌ی خروجی با دیسک-نازک و شعاع انحناهای دیسک-نازک و آینه‌ی خروجی نقش مهمی در تولید باریکه خروجی حلقوی-شکل دارند.

کلید واژه- باریکه‌های حلقوی-شکل، لیزرهای دیسک نازک، تشدیدگر V- شکل، لنز مخروطی.

Annular Output Beam in Axicon-Based V-Shape Resonator

Reza Aghbolaghi, Habib Sahebghoran Charehjaloo, and Vahid Fallahi

Photonics Group, Basics Science Faculty, Bonab University, Bonab

r.aghbolaghi@gmail.com, h.sahebghoran@ymail.com, v.fallahi@bonabu.ac.ir

Abstract- In this paper, an annular output beam generation has been simulated by utilizing an axicon in the V-shape thin-disk laser resonator. In addition, the predominant mode of the resonator has been extracted by employing Collins integral in the Fox-Li iteration method. The results show that the radius of curvatures of the thin-disk and output coupler mirror, and distance between thin disk till output coupler mirror (OCM) play a significant role in producing of annular-shape beams.

Keywords: Conical lens, Annular Bessel beams, Thin-disk lasers, V-shape resonator.

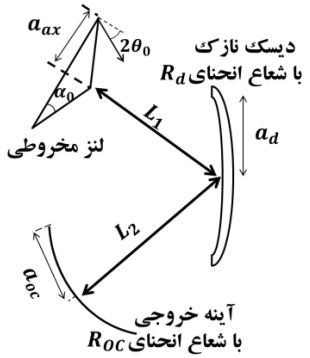
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-16]

مقدمه

باریکه‌های بسل با ویژگی ناوردایی انتشار در فضای آزاد توسط دورنین در سال ۱۹۸۷ معرفی شدند [۱]. ویژگی-های منحصر بفرد غیرپراشی و قابلیت خودبازسازی، موجب بکارگیری آنها در زمینه‌های متنوعی چون میکرو حفاری نوری، هدایت اتمی، دستکاری- میکرو اتمی، و تصویرسازی نوری و ... شده است [۲]. علاوه براین، تا کنون روش‌های متنوعی برای تولید باریکه‌های غیرپراشی مانند مدولاتورهای نوری فضایی [۳]، آینه شکل‌پذیر منقطع [۴]، لنز مخروطی [۵] و ... ارائه شده‌اند. لنز مخروطی در داخل یک مشدد نوری خطی برای اولین بار توسط دو گروه تحقیقاتی [۶] و [۷] ارائه شده است.

از طرفی، لیزرهای دیسک نازک برای اولین بار توسط گیزن در سال ۱۹۹۸ معرفی شدند [۸]. این نوع لیزرها با دمش دیودی دارای مزایایی چون ساختار متراکم، کیفیت خروجی بالا و بازدهی تبدیل بالا هستند که موجب کاربرد آن در زمینه‌های مختلفی چون لیدار، ارتباط لیزری، سلاح‌های لیزری پر انرژی و ... شده است[۹]. تشدیدگر خطی لیزر دیسک نازک بر پایه لنز مخروطی برای اولین بار توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است که این چیدمان اهداف لیزرهای دیسک نازک یعنی خروجی پرتوان همراه با کیفیت باریکه بالا برآورده می‌کند [۱۰]. تاکنون، تشدیدگر نوری V- شکل دیسک نازک برای اهداف متنوعی مانند تولید باریکه‌های قطبیده‌ی شعاعی [۱۱]، تشدیدگر ناپایدار [۱۲]، اثرات لنز حرارتی [۱۳] و ... به کار برده شده است. با این‌حال، در تشدیدگر خطی عملکرد چند-مدی اتفاق می‌افتد، که منجر به افت کیفیت باریکه می‌شود. ولی، به لحاظ دینامیکی تشدیدگرهای V-شکل پایدارند، بنابراین اگر طول کانونی دیسک به دلیل اثرات لنز حرارتی تغییر کند شعاع مد خیلی کم تغییر می‌کند. بنابراین کیفیت باریکه با افزایش توان دمش تقریباً ثابت است [۱۳].

برای اولین بار با استفاده از یک لنز مخروطی در یک تشدیدگر V- شکل همچنین با فرض دیسک نازک به عنوان آینه تاکننده تولید باریکه خروجی حلقوی شکل شبیه‌سازی شده است. ابتدا توصیف خلاصه‌وار چیدمان تشدیدگر لیزری پیشنهادی ارائه شده است. سپس نتایج، بدست آمده از این چیدمان مورد بحث قرار گرفته شده است.



شکل ۱ طرح کلی تشدیدگر V-شکل لیزر دیسک-نازک مبتنی بر لنز مخروطی را نشان می‌دهد. در آن R_d و R_{OC} به ترتیب شعاع انحنای دیسک نازک و آینه‌خروجی را نشان می‌دهند. ضریب شکست و زاویه‌رأس لنز مخروطی بترتیب برابر با ۱/۸۱۵۳ و ۰/۵ درجه می‌باشند. اندازه عرضی a_{ax}، a_d و a_{OC} برابر با ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

چیدمان تشدیدگر V-شکل و تابع عبور

شکل ۱ چیدمان تشدیدگر V-شکل مبتنی بر لنز مخروطی نشان می‌دهد که مناسب برای لیزر دیسک نازک می‌باشد. به دلیل اثرات حرارتی بالا خمیدگی دیسک اجتناب ناپذیر است. در نتیجه برای دیسک نازک شعاع انحنای R_d فرض شده است. علاوه براین، آینه خروجی نیز انحنادار فرض شده است. با توجه به قانون اسنل، موج فرودی بر وجه پشتی لنز مخروطی نازک رایج تحت زاویه $2\theta_0$ از آن خارج می‌شود که توسط رابطه‌ی $\theta_0 = (n-1)\alpha_0$ به پارامترهای زاویه‌ی رأس لنز مخروطی α و

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-16]

ضریب شکست n مربوط می‌شود. طول تشدیدی تشدیدگر از رابطه $L = a_{ax}/2\theta$. داده می‌شود که برابر با مجموع فواصل L_1 و L_2 می‌باشد شکل ۱. انتگرال کولینز از رابطه‌ی زیر داده می‌شود[۱۴]:

$$E(r_m) = \frac{-ik}{B}\int_{0}^{a_n} r_n J_0\left(\frac{k}{B} r_m r_n\right) \exp\left[\frac{ik}{2B}\left(A r_n^2 + D r_m^2\right)\right] T(r_n) E(r_n) dr_n \qquad (1)$$

که در آن $T(r_n)$ تابع عبور المان نوری را نشان می‌دهد که در ادامه تعریف شده است. و همچنین $E(r_n)$ میدان اولیه روی صفحه‌ی مرجع را بیان می‌کند. در این انتگرال A، B، D مربوط به ماتریس کل ABCD هستند که از حاصل-ضریب ماتریس‌های انتقال در فضای آزاد به طول‌های L_1 و L_2 و ماتریس بازتاب دیسک-نازک انحنادار بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ D & C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\frac{2L_2}{R_d} & L\left(1-\frac{2L_2}{R_d}\right)+\frac{2L_2^2}{R_d} \\ \frac{-2}{R_d} & 1-\frac{2}{R_d}(L-L_2) \end{bmatrix} \qquad (2)$$

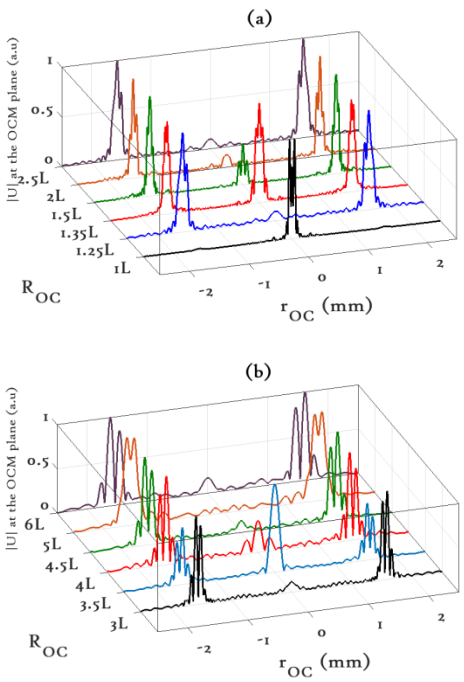
علاوه‌براین توابع عبور لنز مخروطی و آینه‌ی خروجی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$T_{ax}(r_{ax}) = \exp(-i\,2k\,\theta\, r_{ax})$$
$$T_{OC}(r_{OC}) = \exp\left(-\frac{ik r_{OC}^2}{R_{OC}}\right). \qquad (3)$$

با جایگذاری روابط (۲) و (۳) در رابطه‌ی (۱) و با استفاده فکس-لی مد غالب تشدیدگر بعد از ۴۰۰ دور به حالت پایا می‌رسد. لازم به ذکر است که با صفحه‌ی مرجع به همراه موج اولیه تخت روی آن در جلوی آینه خروجی فرض شده است.

بحث نتایج

در این تشدیدگر، باریکه‌ی خروجی حلقوی-شکل تحت شرایط خاص زیر تولید می‌شود. اولین شرط این است که شعاع انحنای دیسک نازک R_d برابر با L انتخاب شود. شرط بعدی این است که $L_1 < L_2$ باشد. شرط آخر این است که شعاع انحنای آینه‌ی خروجی R_{OC} در بازه‌ی [L،۶L) در نظر گرفته شود. با نوشتن ماتریس رفت و برگشتی کل ABCD با احتساب ماتریس عبور لنز مخروطی، می‌توان ویژه مقادیر حالت دوبار رفت و برگشتی r_{two} را محاسبه کرد. برای یک تشدیدگر خطی مبتنی بر لنز مخروطی r_{two} برابر با $L\theta$. است که با قرار دادن مقادیر متناظر برابر با ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد [۱۴]. درحالی‌که، برای تشدیدگر V-شکل، r_{two} برابر با ۰/ $75L\theta$.بدست می‌آید که برابر با ۱/۸ میلی‌متر است. بنابراین، از نقطه نظر اپتیک هندسی، پیک حلقه‌ی تولید شده باید در اطراف مقدار $r_{oc} = 1/67$ میلی‌متر قرار داشته باشد.



شکل ۲ پروفایل عرضی باریکه‌ی خروجی حلقوی-شکل را بر حسب تغییرات شعاع انحنای آینه‌ی خروجی (a) در بازه L تا L

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-16]

۲/۵ و (*b*) در بازه $۳L$ تا $۶L$ را نشان می‌دهد. طول‌های $L_۱$ و L_2 بترتیب برابر با ۱/۴ و ۳/۴ برابر طول تشدیدی انتخاب شده‌اند.

با در نظر گرفتن شرایط خاص مطرح شده، در شکل ۲ پروفایل عرضی باریکه‌ی حلقوی شکل رسم شده است. باتوجه به شکل، واضح است که R_{OC} نباید برابر با L انتخاب شود. در حالی‌که، برای رزوناتور خطی این پیک برای R_{OC} برابر با L روی صفحه‌ی لنز مخروطی ایجاد می‌شود به شرطی‌که دیسک-نازک تخت باشد [۱۰]. اما در تشدیدگر V-شکل، می‌توان تغییر شکل دیسک را به همراه اعمال درجه آزادی برای R_{OC} مد نظر قرار داد. علاوه‌براین، بیشینه‌ای در $r_{oc} = ۰$ وجود دارد که برای R_{OC} برابر با $۱/۳۵L$ و $۳/۵L$ رشد کمی دارد. با این‌حال، نواحی [L،۶L) جز نواحی کاری مناسب جهت داشتن باریکه حلقوی شکل در روی آینه‌ی خروجی هستند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک تشدیدگر V-شکل دیسک نازک مبتنی بر لنز مخروطی شبیه‌سازی شد. مشخص شد که برای داشتن خروجی حلقوی-شکل باید شرط‌های $R_d = L$، $L < R_{OC} \leq ۶$ و $L_۱ < L_۲$ را به تشدیدگر اعمال کنیم. مشخص شد که علاوه بر در نظر گرفتن R_d، می‌توان به R_{OC} درجه آزادی اعمال کرد که این مورد برای رزوناتور خطی اتفاق نمی‌افتد. این یک مزیت برای تشدیدگر پیشنهادی است. طبق پیش‌بینی اپتیک هندسی، r_{two} تشدیدگر V-شکل برای حالت دوبار رفت و برگشتی برابر با ۱/۶۷ میلی‌متر است در حالیکه برای تشدیدگر خطی برابر با ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. یعنی در تشدیدگر V-شکل بیشینه پروفایل باریکه به سمت مرکز آینه‌ی خروجی جابجا می‌شود و این با رسم منحنی پروفایل عرضی باریکه‌ی خروجی تایید شد.

مرجع‌ها

[۱] J. Durnin, J. Miceli Jr, and J. H. Eberly, “Diffraction-free beams,” Phys. Rev. Lett. **۵۸**, ۱٤۹۹, ۱۹۸۷.

[۲] R. Bao, Z. Mou, C. Zhou, Q. Bai, X. He, Z. Han, S. Wang, and S. Teng, “Generation of diffraction-free beams using resonant metasurfaces,” New J. Phys. **۲۲**, ۱۰۳۰٦٤, ۲۰۲۰.

[۳] T. Čižmár and K. Dholakia, “Tunable Bessel light modes: engineering the axial propagation,” Opt. Express ۱۷, ۱۵۵۵۸-۱۵۵۷۰, ۲۰۰۹.

[٤] X. Yu, A. Todi, and H. Tang, “Bessel beam generation using a segmented deformable mirror,” Appl. Opt. **۵۷**, ٤٦۷۷-٤٦۸۲, ۲۰۱۸.

[۵] J. H. McLeod, “The axicon: a new type of optical element,” J. Opt. Soc. A **٤٤**, ۵۹۲-۵۹۷, ۱۹۵٤.

[٦] A. N. Khilo, E. G. Katranji, and A. A. Ryzhevich, “Axicon-based Bessel resonator: analytical description and experiment,” J. Opt. Soc. A. A ۱۸, ۱۹۸٦-۱۹۹۲, ۲۰۰۱.

[۷] J. Rogel-Salazar, G. New, and S. Chávez-Cerda, “Bessel–Gauss beam optical resonator,” Opt. Commun. ۱۹۰, ۱۱۷-۱۲۲, ۲۰۰۱.

[۸] A. Giesen, H. Hügel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, “Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers,” Appl. Phys. B **۵۸**, ۳٦۵-۳۷۲, ۱۹۹٤.

[۹] W. Wang, Y. Gao, D. Sun, X. Du, J. Guo, and X. Liang, “Adjustable-free and movable Nd: YVO ٤ thin disk laser based on the telecentric cat’s eye cavity,” Chin. Opt. Lett. **۱۹**, ۱۱۱٤۰۳, ۲۰۲۱.

[۱۰] R. Aghbolaghi, S. Batebi, and J. Sabaghzadeh, “Thin-disk laser with Bessel-like output beam: theory and simulations,” Appl. Opt. **۵۲**, ٦۸۳-٦۸۹, ۲۰۱۳.

[۱۱] M. A. Ahmed, M. Haefner, M. Vogel, C. Pruss, A. Voss, W. Osten, and T. Graf, “High-power radially polarized Yb: YAG thin-disk laser with high efficiency,” Opt. Express **۱۹**, ۵۰۹۳-۵۱۰۳, ۲۰۱۱.

[۱۲] M. Shayganmanesh and R. Saeedizadeh, “Numerical study of unstable resonator in thin disk laser,” Opt. Quantum Electron. **٤۷**, ۵۷۵-۵۸٦, ۲۰۱۵.

[۱۳] J. Mende, J. Speiser, G. Spindler, W. L. Bohn, and A. Giesen, "Mode dynamics and thermal lens effects of thin-disk lasers," in *Solid State Lasers XVII: Technology and Devices*, (International Society for Optics and Photonics.Year. of. Conference), ٦۸۷۱۰M.

[۱٤] R. I. Hernández-Aranda, S. Chávez-Cerda, and J. C. Gutiérrez-Vega, “Theory of the unstable Bessel resonator,” J. Opt. Soc. A **۲۲**, ۱۹۰۹-۱۹۱۷, ۲۰۰۵.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-16]