بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

تولید باریکه‌ی بسل با استفاده از ماسک فازی مبتنی بر بلور مایع

حبیب خوش سیما[۱]، فرزانه پناهی شالقونی[۱] و محمد یگانه[۱و۲]

[۱] پژوهشکده‌ی فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

[۲] دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه‌ی زنجان، زنجان

khoshsima@tabrizu.ac.ir, farzan.p.70@gmail.com, moyeganeh@iasbs.ac.ir

چکیده - شیوه‌های گوناگونی برای ساخت باریکه‌ی بسل ارائه شده است. یکی از ساده‌ترین این روش‌ها، ایجاد توزیع حلقوی نور است. در این مقاله، روش تجربی برای ساخت باریکه‌ی بسل با استفاده ماسک لیتوگرافی شده به شیوه‌ی ثبت الگو بر بلورمایع آلائیده با رنگینه‌ی آزو متیل‌رِد ارائه شده است. برای حصول بهترین نتیجه، از لیزری با طول موج ۵۳۲ نانومتر برای ثبت این الگو استفاده شده است. طبق مشاهدات انجام شده، با اعمال میدان الکتریکی به سلول بلورمایع برای باریکه‌ی نور قطبیده‌ی خطی، باریکه‌ی بسل تولید شد.

کلید واژه- اپتیک فوریه، باریکه‌ی بسل، بلور مایع، پالایه‌ی فضایی.

Generation of Bessel beam using phase mask based on liquid crystal

Habib Khoshsima[*1], Farzaneh Panahi Shalghoni[1], and Mohammad Yeganeh[1,2]

[1]Research Institute for applied physics and astronomy, Tabriz University, Tabriz, Iran
[2]Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan, Iran.

Abstract- Various methods have been developed for construction of the Bessel beam. One of the simplest methods is generating an annual distribution of light. In this paper, an experimental method for the production of Bessel beam using a lithographic mask based on azo methyl red-doped liquid crystal is presented. In order to obtain the best result, a 532nm laser was used to recording the pattern. According to observation, by applying the electric field to the liquid crystal cell for linearly polarized light, the Bessel beam was produced.

Keywords: Fourier optics, Bessel beam, liquid crystal, spatial filter.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

مقدمه

باریکه‌ی بسل جزو باریکه‌های غیر پراشی است، از این‌رو ویژگی‌های ممتازی نسبت به باریکه‌های دیگر دارد. قابلیت خود ترمیمی و واگرایی کمتر آن در انتشار، کاربردهای بسیار مهمی در زمینه‌های مختلف همانند انبرک نوری [۱]، تله‌اندازی نوری [۲]، ارتباطات نوری در فضای آزاد، میکرولیتوگرافی [۳] و توموگرافی نوری [۴] برای آن ایجاد کرده است. شعاع لوب مرکزی این باریکه می‌تواند از مرتبه‌ی طول موج نور باشد که از مزیت‌های آن برای کاربردهای ذکر شده است. باریکه‌های بسل را می‌توان به‌وسیله‌ی عدسی مخروطی (آکسیکون) [۵]، ایجاد حلقه‌ی نوری [۶]، ماسک دامنه‌ای یا فازی، صفحات هولوگرافی [۷]، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل [۸]، تحریرگر فضایی نور (SLM) و غیره تولید کرد. از آنجا که تبدیل فوریه‌ی فضایی یک حلقه، تابع بسل ایجاد می‌کند، در اینجا با ایجاد حلقه‌ی نوری و انتشار آن، باریکه‌ی بسل ایجاد نمودیم که ساده‌ترین روش تولید آن است.

سلول بلورمایع به‌دلیل ساخت آسان و قابلیت کنترل‌پذیری خواص نوری‌اش با اعمال ولتاژهای پایین، گزینه‌ی مناسبی برای ایجاد حلقه‌ی نوری در تولید باریکه‌ی بسل است. با افزودن رنگینه‌ی آزو به سلول بلورمایع، بستری برای ثبت الگوی حلقه‌ی روشن ازطریق روش ذخیره‌سازی می‌توان ایجاد کرد. اعمال میدان الکتریکی سبب بازجهت‌گیری مولکول‌های بلورمایع شده و با ایجاد اختلاف فاز بین ناحیه‌ی تاریک و روشن درسلول، سبب تولید باریکه‌ی بسل می‌گردد. در این کار از سیستم 4f به‌منظور ایجاد کمترین انحراف و واگرایی باریکه در طول انتشار نیز استفاده گردید [۹].

مبانی نظری

موج بسل به موجی گفته می‌شود که توزیع عرضی میدان الکتریکی آن نسبت به راستای انتشار توسط تابع مرتبه‌ی صفر بسل (J_0) تعریف شود:

$$E(r,\varphi,z)=A\exp(ik_z z)J_0(k_r r), \qquad (۱)$$

که در آن r φ به‌ترتیب مختصات شعاعی و سمتی هستند. z مختصه‌ی در راستای انتشارِ باریکه است. k_z و k_r به‌ترتیب مؤلفه‌های طولی و شعاعی بردار موج هستند. در این رابطه، از مراتب بالاتر تابع بسل صرف‌نظر کرده‌ایم. توزیع شدت الگوی بسل (مرتبه‌ی صفر)، حلقه‌های هم‌مرکزی است که دارای یک لوب مرکزی پرشدت است.

الگوی ماسک مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است که با استفاده از تبدیلات فوریه، موج تخت ورودی را به باریکه‌ی بسل در خروجی تبدیل می‌کند. اگر پراش از میدان ورودی $u_i(r')=A\delta(r'-a)$ (δ تابع دیراک است) که حلقه‌ای نازک به شعاع a است را درنظر بگیریم، برای میدان پراش‌یافته‌ی آن در فاصله‌ی z خواهیم داشت [۹]:

$$u_d(r;z)=\frac{2\pi i}{\lambda z}e^{-ikz}e^{\frac{-i\pi(r^2+a^2)}{\lambda z}}aAJ_0\left(\frac{2\pi a r}{\lambda z}\right), \qquad (۲)$$

که متناسب با تابع بسل مرتبه‌ی صفر است. از آنجا که در عمل ایجاد توزیع میدان حلقوی ایده‌آل با تابعیت شعاعی دلتای دیراک غیرممکن است، از یک سیستم 4f مطابق شکل ۲ که از دو عدسی تشکیل شده است کمک می‌گیریم. در نهایت تبدیلات دو مرحله‌ای در سیستم 4f از صفحه‌ی جسم با توزیع دایره‌ای یکنواخت به شعاع a تا صفحه‌ی تصویر را به شکل زیر می‌توان نوشت:

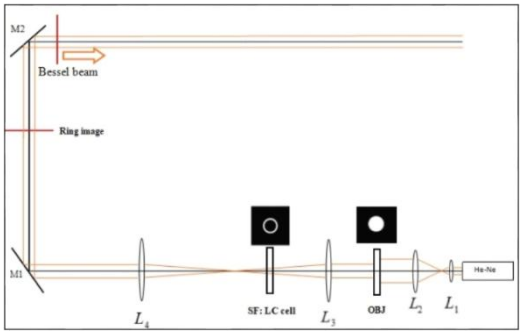
$$u_i(r)=\frac{4\pi^2}{\lambda^2 f^2}\times\int_{p_1}^{p_2}r'dr'J_0\left(\frac{2\pi r r'}{\lambda f}\right)\int_0^a r''dr''J_0\left(\frac{2\pi r' r''}{\lambda f}\right), \qquad (۳)$$

p_1 و p_2 به‌ترتیب شعاع خارجی و شعاع داخلی ماسک حلقه‌ای شکل قرار گرفته در صفحه‌ی فوریه است. مختصات r، r' و r'' به‌ترتیب مربوط به مختصات شعاعی در صفحه‌ی تصویر، صفحه‌ی فوریه و صفحه‌ی جسم است.

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

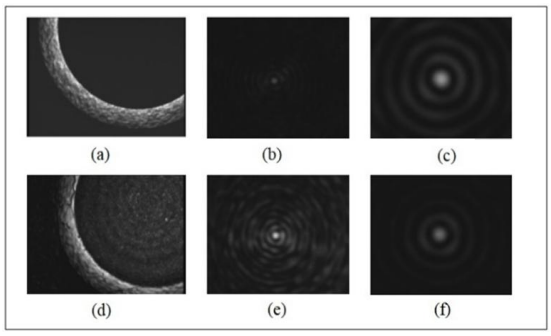
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

شکل۱: (الف) طرح ماسک مورد نظر، (ب) قرینه‌ی ماسک ثبت طرح



شکل ۲: چیدمان تجربی: عدسی های L_1 و L_2 برای موازی سازی لیزر، L_3 و L_4 با f=50 cm برای ایجاد سیستم 4f.

ترکیبات آزو، به‌دلیل ساختار شیمیایی خاص خود می‌تواند به دو شکل ایزومری سیس و ترانس ظاهر شوند. با تابش نور در محدوده‌ی طیف جذبی رنگینه‌ها، احتمال وقوع فوتوایزومریزاسیون ترانس-سیس-ترانس شکل می‌گیرد. پس از طی چرخه‌های متوالی، بردار راهنمای مولکول‌ها عمود بر قطبش نور ورودی خواهد شد و منجر به بازجهت‌گیری رنگینه‌های آزو خواهد گردید و این بازجهت‌گیری روی مولکول‌های بلورمایع، گشتاوری وارد می‌کند و درنهایت باعث بازجهت‌گیری مولکول‌های بلورمایع نیز می‌شود. با ثبت طرح حلقه بر روی سلول بلورمایع به شیوه‌ی ثبت الگو، سطح سلول دارای نواحی تاریک و روشن می‌شود و در نواحی نوردهی‌شده، مولکول‌ها عمود بر نظم سلول اولیه (HG) قرار می‌گیرند و به‌دلیل دوشکستی بالا در مولکول‌های بلورمایع، اختلاف فاز بین دو ناحیه‌ی تاریک و روشن ایجاد می‌شود [۱۰]. پس از شکل‌گیری این الگو روی سلول و اعمال میدان الکتریکی به آن، اختلاف فاز ایجاد شده برای نور قطبیده‌ی خطی که راستای قطبش آن موازی با مولکول‌های روی حلقه است، تغییر می‌کند. اختلاف فاز بین این دو ناحیه باتوجه به اصل پراش و تبدیلات فوریه، باعث سد فرکانس‌های پایین و عبور فرکانس‌های بالاتر شده و پس از عبور از عدسی دوم و گرفتن تبدیل عکس فوریه توسط آن، باریکه‌ی حلقوی نازکی ایجاد می‌کند و در نهایت با انتشار آن، باریکه‌ی بسل شکل می‌گیرد.



شکل۳: بالا: تصاویر خروجی مربوط به ماسک، پایین: تصاویر خروجی مربوط به سلول بلورمایع. (a) و (d) تصویر الگوی حلقوی تولید شده در فاصله‌ی ۱۱۵سانتی‌متری از عدسی دوم، (b) و (e) باریکه‌ی بسل تولید شده در اولین مکان پس از انتشار در فاصله‌ی ۱۷۵ سانتی‌متری از عدسی دوم. (c) و (f) باریکه‌ی بسل تولید شده در فاصله‌ی ۳۱۵ سانتی‌متری از عدسی دوم.

کارهای تجربی

برای ساخت سلول بلورمایع، از سلول آماده با ضخامت ۲۰ میکرون استفاده گردید که دارای یک لایه ITO به‌عنوان الکترود شفاف و یک لایه‌ی شیاردار میکرونی برای ایجاد شیار و نظم‌دهی به مولکول‌های بلورمایع بود. بلور مایع مورد استفاده در این سلول، 1294-1b با دوشکستی $\Delta n = 0.312$ و ضریب شکست عادی $n_o = 1.501$ و ضریب شکست غیرعادی $n_e = 1.813$ بود. رنگینه‌ی آزو متیل‌رد به مقدار ۱ درصد وزنی مورد استفاده قرار گرفت. سلول به مدت یک ساعت در دمای ۷۰°C و به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۴۰ درجه در کوره به منظور جای‌گیری مولکول‌های بلورمایع و سرد شدن تدریجی قرار گرفت. ماسک مورد استفاده دارای قطر داخلی ۴ میلی متر و قطر خارجی ۵ میلی متر است. سپس سلول به همراه قرینه‌ی ماسک را در مقابل نور نویسنده که از لیزر پیوسته ($\lambda = 532nm$) با توان $20mW$ و با قطبش خطی p (قطبش موازی با شیارهای سلول) استفاده شد، به مدت

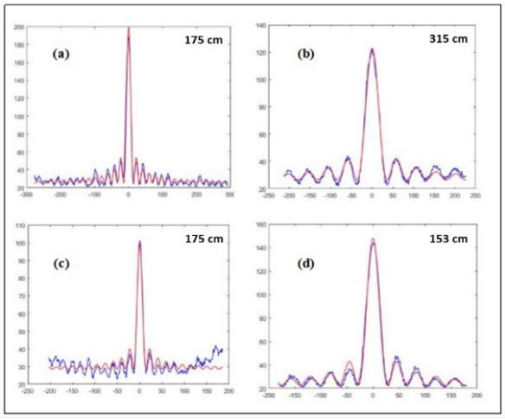
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]

۱۷ ساعت به‌منظور ثبت طرح روی سلول قرار گرفت. در نهایت سلول آماده شده را در چیدمان سیستم 4f قرار دادیم. در این چیدمان از لیزر هلیوم- نئون با طول‌موج ۵۹۴ نانومتر (نارنجی) و توان ۱۷ میلی وات پس از پالایش فضایی و موازی کردن، که خارج از محدوده‌ی طیف جذبی رنگینه‌ی متیل‌رد است، استفاده کردیم. این لیزر در هنگام برخورد به جسم با توزیع شدت دایره‌ای به قطر ۵ میلی‌متر (OBJ) دارای قطر ۷ میلی متر است که به وسیله قطر جسم محدود می‌شود. همچنین، با افزودن قطبش‌گر به چیدمان، قطبش نور را موازی با شیارهای سلول قرار دادیم. با توجه به راستای قطبش، باریکه‌ی کاوشگر در ناحیه‌ی روی طرح حلقه n_e و در سایر نواحی، n_o را تجربه خواهد کرد. با اعمال میدان الکتریکی مربعی با فرکانس ۱/۵ کیلوهرتز به سلول، بردار راهنمای مولکول‌های بلورمایع تغییر می‌کند [10]. با افزایش ولتاژ اعمالی مشاهده می‌شود که در ۵ ولت بازجهت‌گیری در سلول ایجاد شده و در فاصله‌ی ۱۱۵ سانتی‌متر از عدسی L_4، الگوی حلقوی به‌طور کامل ایجاد می‌شود و پس از انتشار باریکه در فاصله‌ی ۱۷۵ سانتی‌متری عدسی L_4، باریکه‌ی بسل شروع به شکل‌گیری می‌کند که این نتایج با حالتی که به‌جای سلول از معادل ماسک حلقوی آن استفاده می‌شد، مطابقت دارد. با افزایش ولتاژ کیفیت باریکه‌ی تشکیل شده بهتر می‌شود. برای مقادیر بالاتر از ۱۰ ولت، کیفیت باریکه‌ی تولیدی کاهش یافته و فقط روشنایی تصویر افزایش می‌یابد (شکل‌های ۳ و ۴).

نتیجه‌گیری

در این کار تجربی، با روش ذخیره‌سازی، ساختار حلقوی از جهت‌گیری مولکول‌های بلورمایع در سلول ایجاد گردید. با قرار دادن این سلول در چیدمان 4f، در خروجی، ساختار حلقه‌ی روشن ایجاد و با انتشار آن، باریکه‌ی بسل ایجاد شد. همچنین اثر ولتاژ بر باریکه‌ی بسل نیز بررسی گردید.



شکل ۴: نمودارهای توزیع شدت باریکه‌های بسل در فواصل انتشاری مختلف. در ردیف بالا از ماسک و پایین سلول بلورمایع استفاده شده.

مرجع‌ها

[1] L. A. Ambrosio, M. Zamboni-rached, H. E. Hernández-figueroa, and I. Senior, “Manipulating Gradient Forces on Optical Tweezers using Bessel Beams”, Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2007. SBMO/IEEE MTT-S International, No. 1, 2007.

[2] B. Shao, S. C. Esener, J. M. Nascimento, E. L. Botvinick, and M. W. Berns, “Dynamically adjustable annular laser trapping based on axicons,” App. Opt., Vol. 45, 2006.

[3] M. Erdely, et al, “Generation of diffraction-free beams for applications in optical microlithography”, J. Vac. Sci. and Technol. B, Vol. 15, 1997.

[4] Z. Ding, H. Ren, Y. Zhao, J. S. Nelson, and Z. Chen, “Highresolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens”, Opt. Lett., Vol. 27, 2002.

[5] G. Scott and N. McArdle, “Efficient generation of nearly diffraction-freebeams using an axicon”, Opt. Eng. Bellingham Vol. 31, 1992.

[6] I. Abdo, N. Ashry, M. Sadek, M. A. Hakim, and D.Khalil, *Effect of ring width on ring generated Bessel beam*, p. 823608, Proc. SPIE, 2012.

[7] A. Vasara, J. Turunen, and A. T. Friberg, “Holographic generation of diffraction-free beams”, Appl. Opt., Vol. 27, 1988.

[8] Arash Sabatyan and Bahar Meshgingalam, “Generation of annular beam by a novel class of Fresnel zone plate”, Appl. Opt., Vol. 53, 2014.

[9] J. M. D. Kowalczyk, S. N. Smith, and E. B. Szarmes, “Generation of Bessel beams using a 4-f spatial filtering system,” Am. J. Phys., Vol. 77, 2009.

[10] F. Moghadas, H. Khoshsima, and B. Olyaeefar, “High diffraction efficiency in permanent optical memories based on Methyl Red doped liquid crystal,” Opt. Quantum Electron., Vol. 47, 2014.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-17]