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

بررسی انتشار باریکه چرخان در حضور مانع کدر

سیدمحمدعلی حسینی‌صابر[۱]، سمیرا رضایی[۲]، احد صابر[۲،۳]، احسان احدی اخلاقی[۱،۳]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱
[۲]دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، کد پستی ۱۱۳۶۷-۵۶۱۹۹
[۳]مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱

چکیده - در این مقاله انتشار باریکه‌های چرخان در حضور مانع کدر بررسی شده است. توزیع شدت پراشیده از لبه مانع با استفاده از روش‌های انتشار همگشت هویگنس و طیف‌زاویه‌ای شبیه‌سازی شده است. نشان داده شده است که باریکه‌های چرخان خاصیت خودترمیمی نسبی دارند، به طوری که توزیع شدت پراشی آن‌ها از یک مانع کدر براثر انتشار به طور نامتقارن ترمیم می‌شود. این ویژگی برای باریکه‌های با بار توپولوژیک بزرگ‌تر در فاصله انتشار نزدیک‌تر اتفاق می‌افتد. همچنین نشان داده شده است که جهت رفتار خودترمیمی با علامت بار توپولوژیک مرتبط است و بنابراین استفاده از الگوی پراش از لبه مانع کدر، روشی آسان و سریع برای تعیین علامت بار توپولوژیک است.

کلید واژه- باریکه چرخان، پراش، خودترمیمی، انتشار طیف‌زاویه‌ای

Investigating the propagation of vortex beams in the presence of an opaque obstacle

S. Mohammad-Ali Hosseini-Saber[1], Samira Rezaie[2], Ahad Saber[2,3], Ehsan A. Aghlaghi[1,3]

[1]Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran
[2]Department of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, 56199-11367, Iran
[3]Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137-66731, Iran

Abstract- In this article, the propagation of vortex beams in the presence of an opaque obstacle is investigated. The intensity distribution of the diffracted beam due to the edge of the opaque obstacle is simulated using the angular spectrum and Huygens convolution propagation methods. It has been shown that the vortex beams have a relative self-healing property so that the diffracted intensity distribution of these beams are healed asymmetrically through propagation. This phenomenon occurs for a larger topological charge at shorter propagation distances. It has also been shown that the direction of self-healing is related to the topological charge sign, and therefore the use of the diffraction pattern from the edge of the opaque obstacle is a simple and fast way to determine the topological charge sign.

Keywords: vortex beam, diffraction, self-healing, angular spectrum propagation

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

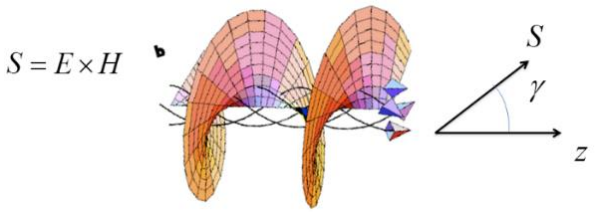
مقدمه

یکی از این خواص فوتون، حمل "تکانه زاویه‌ای" است. تکانه زاویه‌ای به دو نوع "تکانه زاویه‌ای اسپینی" و "تکانه زاویه‌ای مداری" تقسیم می‌شود. تکانه زاویه‌ای اسپینی همواره در باریکه‌های نور مشهود بوده است. این پارامتر در واقع همان قطبش نور است که جزو پارامترهای شناخته شده برای باریکه‌های مختلف از جمله باریکه‌ی گاوسی بوده است. اما تا حدود سه دهه‌ی قبل وجود تکانه زاویه‌ای مداری برای باریکه‌های نور ناشناخته بود و دست یافتن به باریکه‌ی چرخان نقطه‌ی شروع دوباره‌ای برای فیزیک باریکه‌ها بود. باریکه‌های لاگر-گاوسی به عنوان یکی از باریکه‌های ساختار یافته علاوه بر تکانه زاویه‌ای اسپینی، تکانه زاویه‌ای مداری نیز حمل می‌کنند و جبهه موج آنها بستگی زاویه‌ای دارد. در سال ۱۹۹۰ میلادی، تام و ویس توانستند به وسیله نوسان پایدار بین دو مد تبهگن TEM_{10} و TEM_{01} یک مد ترکیبی با ساختار مارپیچی با مشخصه فاز چرخان تولید کنند [۱]. این باریکه‌ها در سال ۱۹۹۲ توسط آلن و همکاران برای بررسی تجربی تکانه زاویه‌ای مداری به‌طور مستقل به‌کار برده شدند [۲]. دو سال بعد هریس و همکارانش موفق به تولید باریکه‌ی لیزری مشابهی با سطح فاز چرخان شدند. باریکه‌های چرخان تولیدی توسط این افراد که مربوط به مد چرخان بود دارای حلقه‌های هم مرکز و مهم‌تر از آن دارای فاز چرخان بود [۱]. با در نظر گرفتن چنین باریکه‌هایی تجربیات جدیدی در مکانیک کوانتومی و روش‌های نوینی برای دستکاری ریز ذره‌ها به وجود آمده است. از جمله مواردی که از باریکه‌های حامل تکانه زاویه‌ای مداری استفاده می‌شود می‌توان به اندازه‌گیری‌های اپتیکی [۳]، میکروسکوپی[۴]، اپتیک کوانتومی [۵]، انبرک نوری و میکرومکانیک [۶] و ارتباطات اپتیکی [۷] اشاره کرد.

در این مقاله، انتشار باریکه‌ی چرخان ایده‌آل با بار توپولوژیک مشخص، از لبه یک مانع کدر را بررسی کرده و نشان می‌دهیم که باریکه‌ی چرخان خاصیت خودترمیمی نسبی دارد. همچنین نشان خواهیم داد که با عبور باریکه-ی چرخان از لبه‌ی مانع کدر می‌توان به راحتی علامت بار توپولوژیک باریکه (راست‌گرد یا چپ‌گرد بودن بودن باریکه) را تشخیص داد.

توصیف نظری

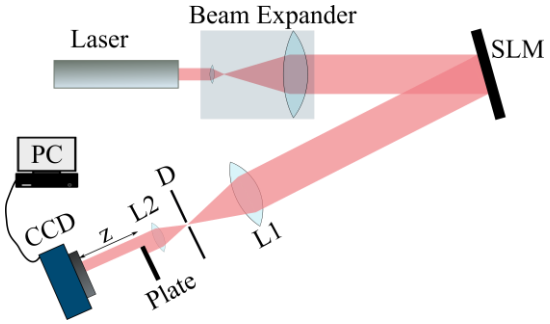
رابطه‌ی توصیف کننده توزیع میدان باریکه چرخان دارای یک جمله فازی $e^{il\varphi}$ است، که در آن φ زاویه‌ی سمتی در صفحه‌ی عمود بر راستای انتشار و l عددی صحیح و نشان دهنده‌ی بار توپولوژیک باریکه‌ی چرخان است. همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، در باریکه‌های چرخان، بردار شار انرژی باریکه (بردار پوئینتینگ) مانند چرخش آب در یک گرداب، حول محور اپتیکی می‌چرخد. با فرود باریکه‌ی چرخان به مانع کدر قسمتی از باریکه مسدود می‌شود و در نتیجه طرح پراش در فاصله‌ی مشخصی بعد از مانع شکل می‌گیرد. از آنجا که باریکه‌ی چرخان دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری است، انتظار می‌رود الگوی پراش باریکه حامل بخشی از اطلاعات اندازه حرکت زاویه‌ای مداری باشد. چرخشی بودن فاز باریکه باعث می‌شود که باریکه در برخورد با لبه‌ی مانع کدر اثری مشابه اثر خودترمیمی داشته باشد. اگر لبه‌ی مانع کدر،



شکل ۱: چرخش بردار پوئینتیگ حول محور اپتیکی باریکه‌ی چرخان [۸].

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]



شکل ۲: چیدمان مفروض برای شبیه‌سازی آزمایش. باریکه‌ی گاوسی لیزر پس از پهن و موازی شدن، با برخورد به SLM تولید باریکه‌ی چرخان می‌کند. در اینجا $L1$ و $L2$ (عدسی) و D (دیافراگم) مرتبه‌ی اول پراش از SLM را از سایر مراتب جدا می کنند.

نیمه‌ی پایین باریکه را مسدود کرده باشد (شکل ۲)، در این صورت با انتشار باریکه پس از مانع، بخشی از سطح موج نیمه‌ی بالایی باریکه که جهت بردار پوئینتیگ آن به سمت پایین است، خود را به سمت پایین کشانده و قسمتی از نیمه‌ی پایینی حذف شده‌ی باریکه را ترمیم می‌کند. این حالت نوعی خاصیت خودترمیمی در باریکه‌های چرخان ایجاد می‌کند. از آنجا که بیشینه زاویه بردار پوئینتینگ باریکه با لبه مانع، $\pi/2$ است، بیشینه حالت خودترمیمی باریکه نیز بعد از مانع به اندازه $\pi/2$ یعنی ربع صفحه خواهد بود.

شبیه‌سازی

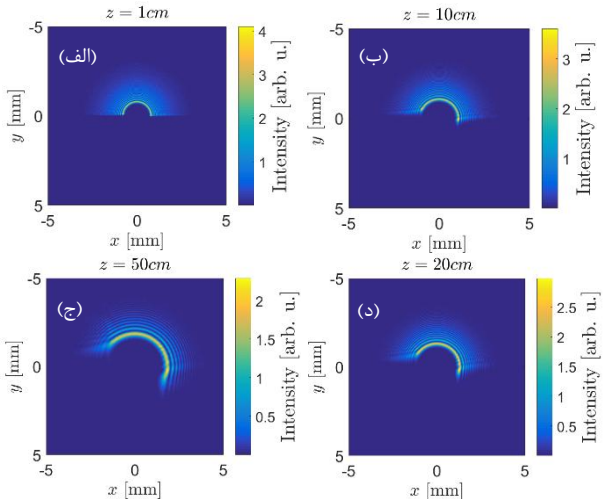
شبیه‌سازی انتشار باریکه‌ها در این مقاله توسط نرم افزار Matlab انجام شده است. برای اطمینان از درستی نتایج، شبیه‌سازی‌های انجام گرفته، انتشار باریکه چرخان بر اساس هر دو روش شبیه‌سازی انتشار طیف‌زاویه‌ای و همگشت هویگنس انجام گرفته است [۹]، که در نهایت نتیجه‌ی هر دو روش شبیه‌سازی کاملا با یکدیگر تطابق داشت. شبیه‌سازی براساس چیدمان مفروض آزمایش شکل۲ انجام شده است. باریکه‌ی گاوسی لیزر ($\lambda = ۶۳۲٫۸$ nm) بعد از عبور از پهن کننده باریکه ($w_0 = ۲٫۵$ mm)، با برخورد به SLM، تبدیل به باریکه‌ی چرخان با میدانی به صورت

$$U = U_G \times \exp(il\varphi) \qquad (۱)$$

می‌شود که $il\varphi$ فاز چرخشی باریکه با بار توپولوژیک l و U_G میدان گاوسی قبل از برخورد به SLM است که با رابطه‌ی

$$U_G = \left(\frac{w_0}{w}\right)\exp\left(-\left(\frac{\rho}{w}\right)^2\right) \times \exp\left(-ikz - \frac{ik\rho^2}{2R} + i\xi\right) \qquad (۲)$$

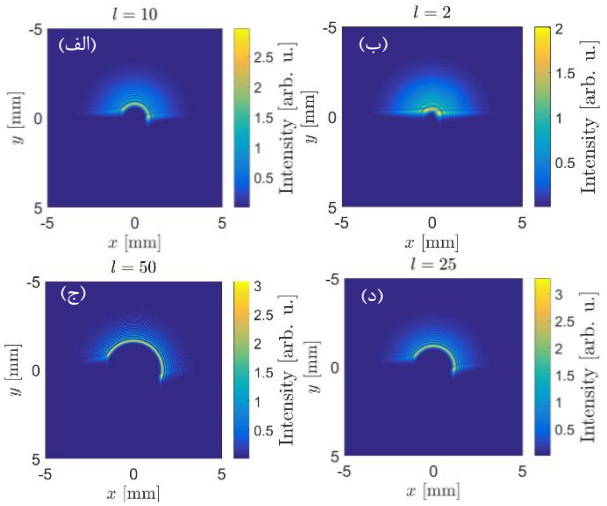
داده می‌شود. z، ρ، k، ξ و w_0 به ترتیب فاصله انتشار از کمر باریکه، مختصات عرضی، عدد موج، فاز گوی و پهنای کمر باریکه و نیز R و w به ترتیب شعاع انحنا و قطر باریکه در z را نشان می‌دهند. بعد از جداسازی مرتبه مورد نظر پراش SLM توسط دو عدسی $L1$ و $L2$ و نیز دیافراگم D، طرح شدت باریکه چرخان حاصل، بعد از عبور از لبه تیغه‌ی کدر و انتشار به اندازه‌ی فاصله‌ی z از تیغه ثبت می‌شود. در شکل ۳ اثر خودترمیمی نسبی باریکه‌ی چرخان با بار توپولوژیک $l = ۲۵$ در اثر انتشار بعد از مانع در z های مختلف نمایش داده شده است. اثر خودترمیمی بعد از مانع به مرور شکل گرفته و زیاد می‌شود تا به بیشینه حالت خود برسد. همچنین هرچه بار توپولوژیک باریکه بیشتر باشد، اثر خودترمیمی نسبی قوی‌تری در اثر انتشار ایجاد خواهد کرد.



شکل ۳: اثر خودترمیمی نسبی باریکه چرخان با بار توپولوژیک $l = ۲۵$ در فواصل (الف) ۱، (ب) ۱۰، (ج) ۲۰ و (د) ۵۰ سانتی متر از لبه مانع کدر.

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

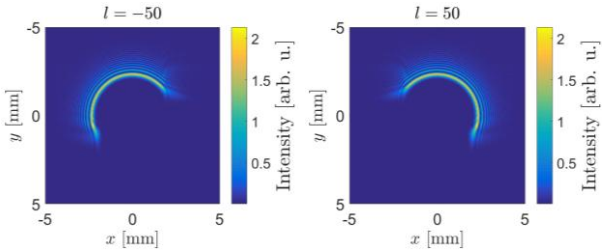
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]



شکل ۴: اثر خودترمیمی نسبی باریکه چرخان در فاصله‌ی $z = ۱۵$ سانتی متر از لبه مانع کدر با بار توپولوژیک (الف) ۲، (ب) ۱۰، (ج) ۲۵ و (د) ۵۰.

شکل ۴ اثر خودترمیمی را برای l های مختلف نشان می‌دهد. هر چه بار توپولوژیک باریکه بیشتر باشد، باریکه تا زوایای بیشتری از قسمت حذف شده را می‌تواند ترمیم کند.

همچنین از خاصیت خودترمیمی نسبی باریکه‌ی چرخان می‌توان برای تعیین علامت بار توپولوژیک l، یعنی تعیین جهت چرخش سطح موج باریکه، استفاده کرد. شکل۵ شبیه‌سازی دو باریکه‌ی چرخان با بار توپولوژیک ۵۰- و ۵۰+ را در عبور از لبه مانع کدر نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، در l های مثبت (پاد ساعت گرد) سمت راست باریکه از پایین شروع به ترمیم خود کرده، و بنابراین قسمت سمت راست باریکه پایین تر از لبه مانع کدر می‌آید. همچنین در l های منفی (ساعت گرد) سمت چپ باریکه از پایین شروع به ترمیم خود کرده و قسمت سمت چپ باریکه



شکل (۵): باریکه‌های چرخان با بار توپولوژیک ۵۰- (راستگرد، شکل سمت راست) و ۵۰+ (چپ گرد، شکل سمت چپ)

پایین تر از مرز لبه مانع کدر دیده می‌شود. بنابراین مشاهده می‌شود که با قرار دادن یک مانع کدر (لبه مانع کدر) در مقابل باریکه‌های چرخان، می‌توان به راحتی علامت بار توپولوژیک باریکه، یعنی جهت چرخش سطح موج باریکه را تعیین کرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله انتشار باریکه‌ی چرخان در حضور مانع کدر (لبه مانع کدر) بررسی شد. نشان داده شد که باریکه‌ی چرخان دارای خاصیت خودترمیمی نسبی است. همچنین روشی بسیار ساده و در عین حال کاربردی برای تعیین علامت بار توپولوژیک l باریکه معرفی شد.

مرجع‌ها

[1] Chr. Tamm and C. O. Weiss, "*Bistability and optical switching of spatial patterns in a laser*," J. Opt. Soc. Am. B 7, 1034-1038, 1990.

[2] Les Allen, Marco W Beijersbergen, RJC Spreeuw, JP Woerdman, "*Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes*", Phys. Rev. A, 45, 8185, 1992.

[3] Aniceto Belmonte, Carmelo Rosales-Guzmán, and Juan P. Torres, "Measurement of flow vorticity with helical beams of light," Optica 2, 1002-1005, 2015.

[4] Severin Fürhapter, Alexander Jesacher, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte, "*Spiral interferometry*," Opt. Lett. 30, 1953-1955, 2005.

[5] Wang X L et al "*Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon*" Nature 518 516–9, 2015.

[6] David G. Grier, *"A revolution in optical manipulation"*, Nature volume 424, pages 810–816, 2003.

[7] Willner A. E. et al., "*Optical communications using orbital angular momentum beams"* Adv. Opt. Photon. 7 66–106, 2015.

[8] Miles Padgett and Les Allen. "*Light with a twist in its tail"*, Contemporary Physics, volume 41, 275-285, 2000.

[9] Myung K. Kim, "Digital Holographic Microscopy", Springer, 2011.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]