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

تبدیل نمایه‌ی گاوسی پرتوی لیزر به نمایه‌ی بسل با استفاده از یک مدوله ساز فضایی دامنه

عاطفه کیخسروی[۱] ؛ سعید قوامی صبوری[۲] ؛ علیرضا خورسندی[۳]

[۱] **گروه فیزیک،دانشگاه‌اصفهان،اصفهان،** a.keikhosravi@sci.ui.ac.ir

[۲] **گروه فیزیک،دانشگاه‌اصفهان،اصفهان،** ghavami@sci.ui.ac.ir

[۳] **گروه فیزیک،دانشگاه‌اصفهان،اصفهان،** a.khorsandi@sci.ui.ac.ir

چکیده - پرتوی بسل به عنوان یک پرتوی غیرپراشی، دارای کاربردهای وسیعی در حوزه‌ی علم و صنعت است. روش-های مختلفی برای تولید پرتو با این نمایه وجود دارد. در بین این روش‌ها، استفاده از ابزار کنترل رایانه‌ای مانند مدولاتور فضایی نور، امکان تولید این پرتو را به صورت فعال فراهم می‌کند. در این پژوهش با ایده از تولید پرتوی بسل به وسیله یک حلقه، با استفاده از نرم افزار متلب المان پراشی مناسب برای تولید نمایه‌ی بسل را طراحی کرده و سپس با حل عددی انتگرال پراش، طرح پراش از این المان، شبیه سازی و بررسی شده‌است؛ در نهایت المان پراشی طراحی شده با استفاده از مدولاتور فضایی دامنه‌ای نور در مسیر یک پرتوی گاوسی قرار گرفته و پرتوی شبه بسل به صورت تجربی در آزمایشگاه تولید و اندازه‌گیری شده‌است.

کلید واژه- المان‌پراشی، پرتوبسل، پرتوگاوسی، نمایه‌ی پرتو، مدولاتورفضایی‌نور.

Converting the profile of a Gaussian beam to a Bessel one using spatial amplitude modulator

Atefeh, Keikhosravi[1]; Saeed, Ghavami Sabouri[2]; Alireza, Khorsandi[3]

[1]Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, a.keikhosravi@sci.ui.ac.ir

[2] 1Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, ghavami@sci.ui.ac.ir

[3]Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, a.khorsandi@sci.ui.ac.ir

Abstract- The Bessel beam, as a non-diffracted beam, has wide applications in the field of science and industry. There are various ways to produce a beam with this profile. Among these methods, the use of computer-controlled tools such as the Spatial Light Modulator allows the active beam to be generated. In this paper, with the idea of producing a Bessel beam by a ring, using a mathematical software, the diffractive element is designed to generate the Bessel beam, and then, by numerical solution of the Fresnel diffraction integral, the outline model is simulated; eventually by putting the diffractive element on the path of Gaussian beam using a spatial amplitude modulator, generated Bessel-Gauss beams in laboratory.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

Keywords: Beam profile, Bessel beam, Diffractive optical element, Gaussian beam, Special light modulator.

مقدمه

پرتو بسل برای نخستین بار به عنوان یک ساختار ریاضی، توسط دورنین در سال ۱۹۸۷ بیان شد. دورنین با نگاهی به پاسخ‌های وایتکر برای حل معادله موج هلمهولتز دریافت که پاسخ ویژه تابع بسل، مستقل از راستای انتشار است[۱]. این پاسخ دارای ویژگی‌هایی منحصر به فرد است. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به حد پراش کم و خودترمیم‌کنندگی اشاره کرد. طبق تعریف تابع بسل انتظار می‌رود که نمایه‌ی عرضی توزیع شدت این پرتو، حلقه‌هایی هم مرکز باشند. دورنین و همکارانش نشان دادند که می‌توان پرتو بسل تقریب یافته(شبه بسل)را، به طور تجربی تولید کرد[۲]. تولید پرتو بسل به روش‌های مختلفی امکان پذیر است. یکی از معمول‌ترین روش‌ها، استفاده از عدسی اکسیکون است[۳]. در این روش پرتو گاوسی با عبور از اکسیکون، نمایه‌ی‌بسل را تولید می‌کند. از جمله دیگر روش‌های تولید پرتو بسل استفاده از یک حلقه با شعاع مشخص می‌باشد[۴]. از کارآمدترین روش‌ها در تولید این پرتو، تکنیک هولوگرافیک (تمام نگاری) است که در آن تغییر فاز مناسب برای تولید پرتو بسل، بر روی یک پرتو گاوسی اعمال می‌شود. این روش خود به دو دسته ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. در روش ثابت ابتدا فاز مناسب برای تولید نمایه‌ی بسل طراحی شده و سپس آن را روی ماسک مناسب سونش می‌کنند. این روش مانند دو مورد قبل، یک روش غیر فعال است و بعد از چاپ ماسک ویژگی‌های پرتو قابل تغییر نیست. در روش متغیر، هولوگرام متغیر با ابزار کنترل کامپیوتری همانند مدولاتور فضایی نور (SLM) طراحی می‌شود[۵]. در سال‌های اخیر با استفاده از مدولاتور فضایی نور، این امکان فراهم شده است تا با طراحی الگوی فضایی مناسب، شکل دلخواه پرتو را ایجاد کرد. به عبارتی با استفاده از این ابزار می‌توان میزان عبور و یا بازتاب نور را کنترل و دستکاری کرد. در این پژوهش ابتدا با استفاده از نرم افزار متلب المان پراشی مناسب برای تولید پرتو بسل را طراحی کردیم و سپس با حل عددی انتگرال پراش فرنل طرح خروجی شبیه سازی شده است. در نهایت المان طراحی شده با استفاده از مدولاتور فضایی دامنه‌ای در مسیر یک پرتو گاوسی لیزر قرار گرفته و پرتو بسل به طور تجربی در آزمایشگاه تولید شده‌است.

مبانی نظری

پراش مبنای اصلی اپتیک موجی است. هر عاملی که سبب انحراف نور از مسیر مستقیم شود، در صورتیکه ناشی از شکست و بازتاب نباشد، پراش نامیده می‌شود. مطابق این تعریف، واگرایی پرتو در طی انتشار نیز پراش محسوب می‌شود. بر خلاف امواجی مانند موج گاوسی، امواج غیرپراشی مانند بسل بدون پراش منتشر می‌شوند؛ به عبارتی نمایه عرضی شدت آنها ضمن انتشار تغییر نمی‌کند. تئوری پراش این امکان را فراهم می‌کند تا نحوه‌ی تغییر جبهه‌ی موج و انتشار آن بعد از تابش به المان پراشی محاسبه گردد. پراش فرنل در ناحیه ای در نزدیک صفحه‌ی پراش اتفاق می‌افتد. اگر فرض شود که ابعاد المان پراشی از طول موج نور فرودی بزرگتر است؛ برای یک جبهه‌ی موج کروی، دامنه‌ی میدان پرتو خروجی بر اساس تئوری هویگنس و تقریب فرنل، در هر نقطه از صفحه‌ی تصویر به صورت رابطه‌ی (۱) می‌باشد[۶]. در رابطه‌ی (۱)، (x,y) مختصات صفحه‌ی المان پراشی، (u,v) مختصات صفحه‌ی تصویر و $A(x,y)$ تابع المان پراشی در صفحه‌ی پراش است.

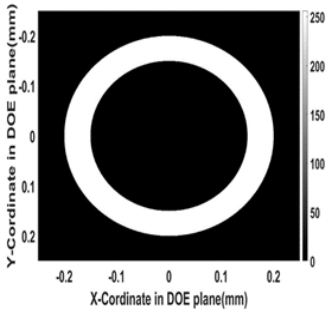
$$E(u,v)=\frac{e^{ikz}e^{i\frac{k}{2z}(u^2+v^2)}}{i\lambda z}\int_{-\infty}^{+\infty}\int A(x,y)\times \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2+y^2)\right]\times \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda z}(xu+yu)\right]dxdy \qquad (۱)$$

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

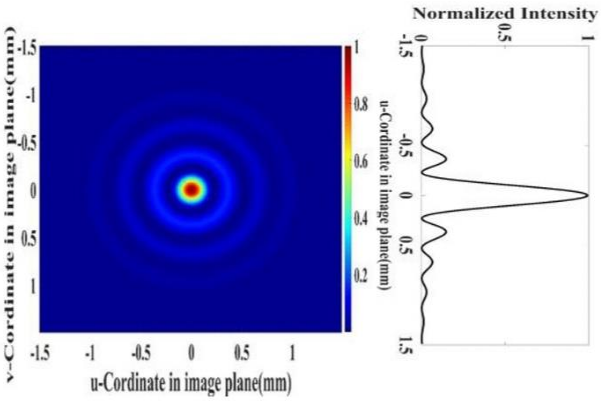
طراحی المان‌پراشی و شبیه‌سازی

برای تولید پرتوی بسل ابتدا با استفاده از نرم افزار متلب تابع المان پراشی $A(x,y)$ را به صورت حلقه‌هایی مطابق شکل (۱)با شعاع‌ها و ضخامت‌های مختلف طراحی‌می‌کنیم. ابعاد صفحه‌ی پراشی۰/۵میلی‌متر مربع و رزولوشن ۳۰۰×۳۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل۱: حلقه‌ی طراحی شده با شعاع‌داخلی ۱۵۰ و شعاع‌خارجی ۲۰۰میکرومتر.

در ادامه با حل عددی انتگرال پراش فرنل، توزیع شدت به دست‌آمده در صفحه‌ی تصویر به ازای حلقه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد صفحه‌ی تصویر ۳ میلی‌متر مربع و رزولوشن ماتریس توزیع شدت نیز ۳۰۰×۳۰۰ می‌باشد. طول موج در نظر گرفته شده برای انجام محاسبات ۵۳۲ نانومتر است. به عنوان مثال نحوه‌ی توزیع شدت و تصویر نمایه‌ی عرضی پرتو حاصل از پراش از المان حلقه در فاصله‌ی۲۰ سانتی‌متری از این المان در شکل(۲) نمایش داده‌شده‌است.

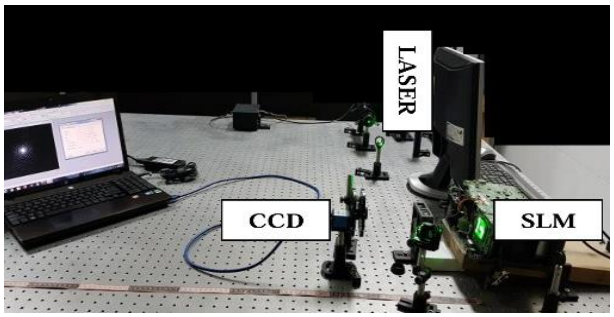


شکل۲: توزیع شدت و طرح پراش حاصل از حل عددی انتگرال پراش با تابع پراشی حلقه در فاصله ۲۰ سانتی‌متری.

به منظور بررسی تأثیر ابعاد و ضخامت حلقه بر نمایه‌ی حاصل شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری به ازای حلقه‌های مختلف، محاسبه شده‌است. نتایج این محاسبات در نمودارهای شکل ۵ و ۶ قابل مشاهده‌است.

چیدمان آزمایشگاهی و تولید پرتو شبه بسل

برای برپایی این چیدمان از یک لیزر هارمونیک دوم Nd:YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر استفاده شده‌است. نور لیزر پس از بازتاب از یک آینه تخت وارد مدولاتور فضایی دامنه‌ای می‌شود. در نهایت نور بازتاب شده از ریزآینه‌های موجود در مدولاتور یک نمایه شبه بسل را تشکیل می‌دهد. به منظور تصویر برداری از نمایه‌ی تولیدشده از یک دوربین دیجیتال از نوع CCD با نام تجاری DMK 23U274 استفاده شده‌است. همچنین برای جلوگیری از آسیب CCD فیلتر کاهنده شدت در مقابل آن قرار داده‌ایم. در شکل(۳) چیدمان آزمایشگاهی تولید پرتو بسل نمایش داده شده‌است.



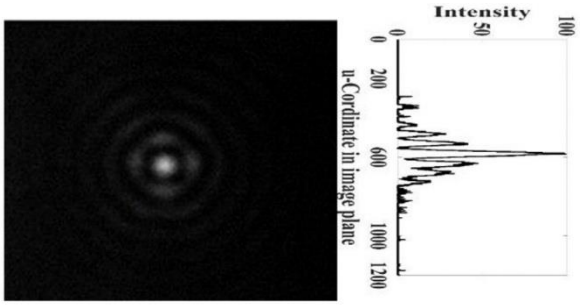
شکل۳: چیدمان آزمایشگاهی تولید پرتو شبه بسل

در شکل (۴) نمونه‌ای از نمایه‌ی عرضی پرتو تولید شده در آزمایشگاه و نحوه‌ی توزیع شدت آن در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از مدولاتور قابل مشاهده‌است. تصاویر نمایه به ازای حلقه‌هایی با ابعاد و ضخامت‌های مختلف ثبت و سپس با استفاده از نرم‌افزار متلب، شعاع لکه‌ی مرکزی هر تصویر اندازه‌گیری شده‌است. به این منظور با فراخوانی هر تصویر و در نظرگرفتن اندازه‌ی مربوط به هر پیکسل دوربین، تعداد پیکسل‌های تشکیل‌دهنده‌ی لکه‌ی مرکزی شمارش

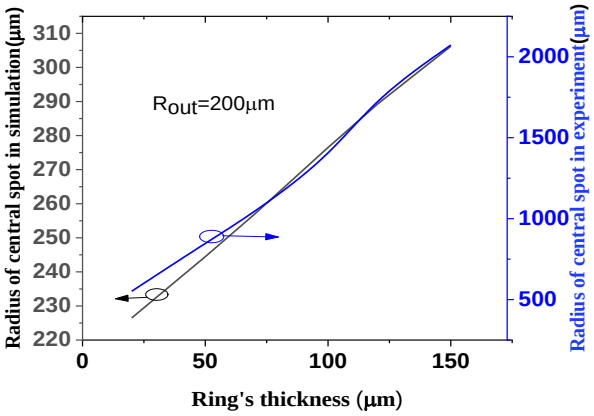
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

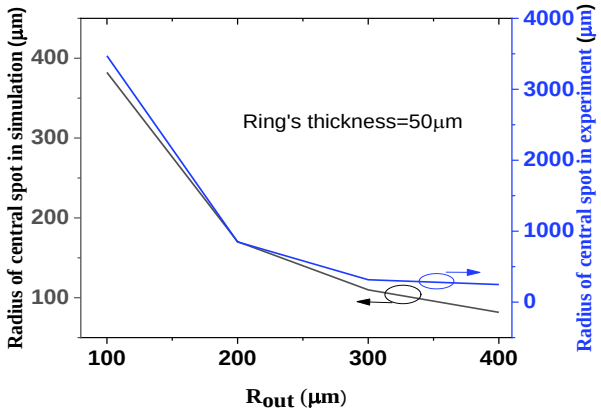
می‌شود. نتایج حاصل در منحنی‌های شکل ۵ و ۶ مشخص شده‌است.



شکل۴: نمایه‌ی عرضی پرتو تولید شده در آزمایشگاه و نحوه‌ی توزیع شدت آن در فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از مدولاتور.



شکل۵: شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه‌های حاصل از المان‌های حلقه با شعاع خارجی ثابت ۲۰۰میکرومتر و ضخامت‌های مختلف در فاصله‌ی ۲۰ سانتیمتری از المان‌پراشی.



شکل۶ : شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه‌های حاصل از المان‌های حلقه با پهنای ثابت ۵۰میکرومتر و شعاع خارجی مختلف. در فاصله‌ی ۲۰سانتی‌متری از المان پراشی .

نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت حلقه سبب افزایش شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه می‌شود. این موضوع با توجه به افزایش توان عبوری از حلقه قابل پیش‌بینی است. افزایش شعاع خارجی حلقه، با کاهش شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه همراه است. تفاوت مقادیر تجربی و شبیه‌سازی به دلیل عوامل مختلفی همچون تفاوت اندازه‌ی تصویر اعمالی در مدولاتور و المان موجود در شبیه سازی است. اگرچه نحوه‌ی تغییرات با هم تطابق دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نحوه‌ی تولید پرتو شبه بسل با استفاده از المان پراشی حلقه فعال، به صورت نظری و تجربی بررسی شد. همچنین تأثیر ابعاد و ضخامت حلقه بر شعاع لکه‌ی مرکزی نمایه مورد مطالعه قرار گرفت. به طور کلی تولید امواج بسل با استفاده از یک حلقه، پر بازده نیست زیرا بخش زیادی از توان پرتو ورودی، از حلقه عبور نمی‌کند. بنابراین برای کاربردهایی که نیازمند شدت بالا است، مناسب نیست.استفاده از المان‌حلقه فعال این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان پرتو شبه بسل با ویژگی‌های دلخواه را تولید کرد.

مرجع‌ها

[1] J. Durnin, J. Miceli Jr, and J. Eberly, "Diffraction-free beams," Physical review letters **58**, 1499 (1987)

[2] J. Durnin, "Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory," JOSA A 4, 651-654 (1987).

[3] G. Scott, and N. McArdle, "Efficient generation of nearly diffraction-free beams using an axicon," Optical Engineering 31, 2640-2644 (1992).

[4] M. A. Mahmoud, M. Y. Shalaby, and D. Khalil, "Propagation of Bessel beams generated using finite-width Durnin ring," Applied optics 52, 256-263 (2013)

[5] D. McGloin, and K. Dholakia, "Bessel beams: diffraction in a new light," Contemporary Physics 46, 15-28 (2005).

[6] A. Vijayakumar, and S. Bhattacharya, Design and fabrication of diffractive optical elements with MATLAB (SPIE press, 2017).

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]