بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

اثر فیلتر گاوسی بر خواص کانونی اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی

آرش ثباتیان و سید اکبر حسینی

دانشکده فیزیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

چکیده- اکسیلن عنصر پراشی است که خواص کانونی عدسی‌های کروی و عدسی‌های محور مخروطی را با هم دارد. عدسی‌های کروی قدرت تفکیک بالا و عدسی‌های محور مخروطی عمق کانونی بلندی دارند. با قرار دادن روزنه‌های غربال فوتونی منطبق بر حلقه‌های تاریک اکسیلن، یک اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی خواهیم داشت که قدرت تفکیک بالاتری نسبت به اکسیلن دارد. در این مقاله خواص کانونی اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با دو توزیع کلاسیک و گاوسی حفره‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک، تنها کمی قدرت تفکیک را افزایش می‌دهد، اما توزیع گاوسی با فیلتر کردن فرکانسهای فضایی بالا، علاوه بر بالا بردن قدرت تفکیک، شدت کانون را تا حد خوبی ارتقا می‌دهد.

کلید واژه: اکسیلن، اگزیکن، عدسی محور مخروطی، غربال فوتونی.

Effect of Gaussian filter on focusing properties of axilens based photon sieve

Arash Sabatyan and Seyyed Akbar Hoseini

Department of Physics, University of Urmia, Urmia

Abstract: Axilens is a diffractive element that has focusing properties of spherical and conical lens. Spherical lens has high resolution and conical lens has high focal depth. By substituiting apertures of photon sieve into the dark rings of axilens, we have axilens based photon sieve that has more resolution to axilens. In this paper, focusing properties of axilens based photon sieve with two classical and Gaussian distribution of apertures compared together. Axilens based photon sieve with classical distribution just enhanced the resolution power a few. But Gaussian distribution by filtering high space frequencies, in addition to increasing resolution power, enhanced the focal intensity.

Keywords:Axilens, Axicon, Conical lens, Photon sieve.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

۱-مقدمه

با کشف پرتو x، زمینه‌های کاربردی زیادی هم برای آن پیدا شد که نیاز به ابزارهای اپتیکی مخصوص به خود داشت. عدسی‌های شکستی به خاطر جذب بالای پرتو x جای خود را به عدسی‌های پراشی داده و توانایی‌های عملی زیادی را در علوم، تحقیقات، پزشکی و صنعت نشان داده‌اند. اولین نمونه از عدسی‌های پراشی را فرنل ارائه داد که تیغه منطقه‌ای فرنل [1] نام دارد و توزیع فازی آن به شکل

$$\varphi(r) = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{r^2}{2f} \qquad (۱)$$

است. کیپ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ توزیعی را ارائه دادند که با تعبیه روزنه‌ها بر حلقه‌های تاریک تیغه منطقه‌ای فرنل، باعث افزایش قدرت تفکیک تیغه منطقه‌ای فرنل شد[1]. این نوع عدسی به خاطر ظاهر شبیه به غربالش، غربال فوتونی [2] نام گرفت. تابع پاسخ غربال فوتونی از تیغه منطقه‌ای فرنل کمتر است و به همین دلیل باعث کاهش شدت می‌شود. در بعضی زمینه‌های کاربردی نیاز به عمق کانونی بلند هست، در حالی که عدسی‌های پراشی کروی با توزیع فازی رابطه ۱ ، عمق کانونی بسیار کمی دارند.

مکلئود در سال ۱۹۵۴ اگزیکن [3] را به عنوان یک عدسی محور مخروطی معرفی کرد[2] که دارای عمق کانونی بلند و قدرت تفکیک پایین است. توزیع فازی این عنصر به صورت خطی و به شکل

$$\varphi(r) = \frac{\pi}{\lambda}\frac{r}{a} \qquad (۲)$$

است که ضریب a در این رابطه عمق کانون را تعیین می‌کند. عمق کانون در این نوع عدسی به شکل $0 < z < aR$ است که z در آن فاصله محوری از عدسی و R شعاع عدسی است. فریزم و همکاران در سال ۱۹۹۱ توزیع فازی کروی جدیدی را بر اساس وابستگی فاصله کانونی به شعاع ارائه دادند[3] که خصوصیات تفکیک بالای عدسی‌های کروی و عمق کانونی عدسی‌های محور مخروطی را داراست. این عدسی کروی اکسیلن [4] نام دارد و توزیع فازی آن به شکل

$$\varphi(r) = \frac{\pi}{\lambda}\frac{r^2}{f_0+\frac{\delta f}{R^2}r^2} \qquad (۳)$$

است که پارامترهای ثابت در آن طول موج(λ)، شعاع(R)، ابتدای کانون (f_0) و عمق کانون (δf) است. تعداد حلقه‌ها را از رابطه

$$N_{max} = \frac{R^2}{\lambda(f_0+aR^2)} \qquad (۴)$$

و شعاع حلقه‌ها

$$r_N = \sqrt{\frac{N\lambda f_0}{1-N\lambda a}} \qquad (۵)$$

را می‌توان محاسبه کرد که در این روابط $a = \frac{\delta f}{R^2}$ است. حال با قرار دادن روزنه‌های غربال فوتونی منطبق بر حلقه‌های تاریک اکسیلن، یک اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی خواهیم داشت که به اختصار آن را APS [5] می‌نامیم. در مقایسه عملکرد اکسیلن و اکسیلن بر پایه غربال فوتونی، نمونه‌ی اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(چگالی حفره‌ها در طراحی اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی به صورت کلاسیک بر اساس رابطه div=۱۶ m، که m در این رابطه شماره منطقه فرنل است، در نظر گرفته شد) مقداری قدرت تفکیک اکسیلن را با کاهش ماکزیمم‌های ثانویه افزایش ولی با کاهش شدت، کمی هم عمق کانونی را کاهش می‌دهد[۴].گرچه اکسیلن بر پایه غربال فوتونی با توزیع کلاسیک پیکهای ثانویه را کم می‌کند و بدین ترتیب کمی قدرت تفکیک را افزایش می‌دهد، ولی با کاهش شدت، عمق کانونی را اندکی کاهش می‌دهد. برآنیم که توزیع جدیدی از حفره‌ها را ارائه دهیم که این مشکل را تا حدودی حل کند. با این وجود که غربال فوتونی اساسا فاز را تغییر نمی‌دهد، می‌توان با دستکاری فرکانسهای فضایی، خواص کانونی را تغییر داد. مثلا می‌توان قدرت تفکیک را بدون کاهش در عمق کانونی زیاد کرد. این توزیع جدید به فرم کلی

$$w_n = n_0 exp\left(-\frac{-(r_n-r_0)^2}{\alpha^2}\right) \qquad (۶)$$

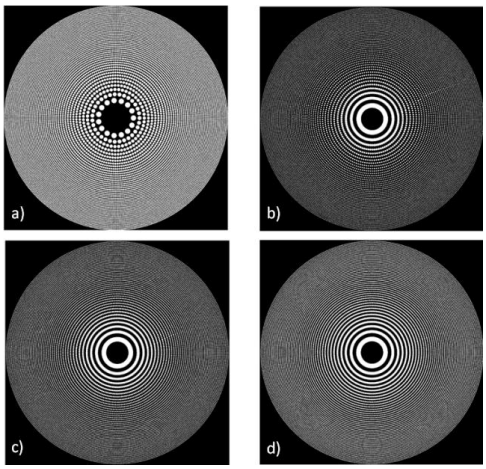
معرفی می‌شود که r_n شعاع ناحیه nام اکسیلن است و پارامترهای α، r_0 و n_0 قابل تغییرند. تابع توزیع گاوسی معرفی شده به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند و به حذف فرکانسهای فضایی بالا می‌پردازد. حال باید ضرایب را به صورت مناسبی اختیار کنیم که نمونه‌ای با بهترین عملکرد بدست آید.

۲-طراحی و شبیه‌سازی

اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با مشخصات R=۷/۵ mm، dz=۳۰mm و f_0=۸۳۵mm، با توزیع کلاسیک و سه نمونه گاوسی(GAPS [6]) با مقادیر n_0=۶۵۰، n_0=۸۵۰ و n_0=۱۰۰۰ برای طول موج۶۳۵nm طراحی شد[5](شکل۱). به علت پیچیده بودن تابع عبور اکسیلن برای شبیه سازی از ابزار تبدیل فوریه سریع FFT [7] در نرم افزار متلب[6] استفاده شد. برای محاسبه و ترسیم توزیع شدت محوری، ابتدا روی بازه مورد نظر در فواصل ۱ میلی‌متری به وسیله ابزار تبدیل فوریه سریع همتافتگی [8] محاسبه شد و از هر بار محاسبه همتافتگی، داده‌ی مربوط به محور اپتیکی جدا شده و بر حسب فاصله از نمونه رسم شد.

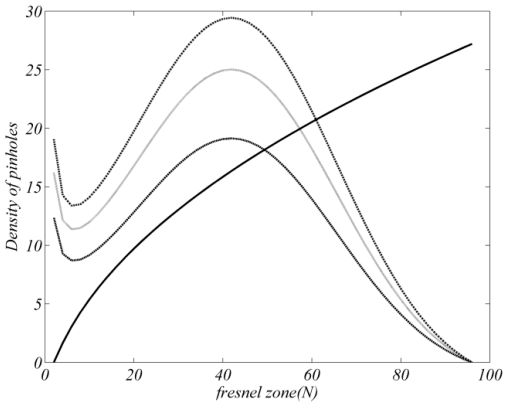
[1] Fresnel zone plate
[2] Photon sieve
[3] Axicon
[4] Axilels
[5] Axilens based photon sieve
[6] Gaussian axilens based photon sieve
[7] Fast fourier transform
[8] Convolution

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

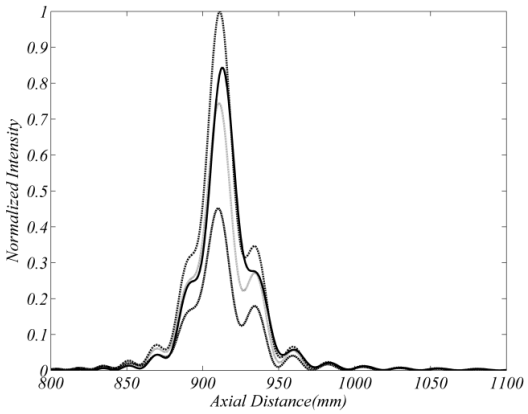


شکل ۱: نمونه‌های طراحی شده: اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع a) کلاسیک b) گاوسی n_0=۶۵۰ c) گاوسی n_0=۸۵۰ d) گاوسی n_0=۱۰۰۰

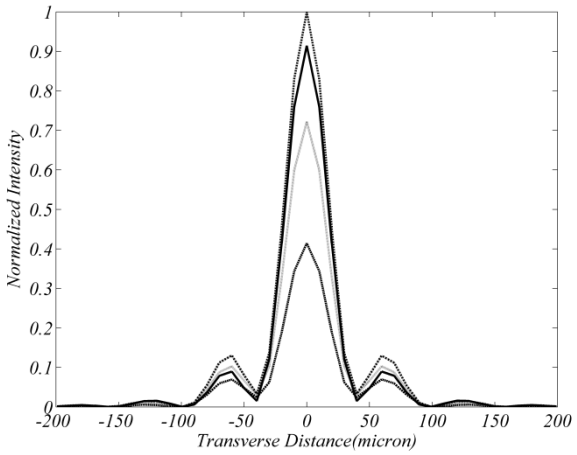
با توجه به شکل ۱ با افزایش ضریب n_0 در تابع توزیع روزنه‌های GAPS تعداد حلقه‌های همپوشانی شده افزایش می‌یابد. در شکل ۲ تابع چگالی روزنه نمونه‌های طراحی شده محاسبه و ترسیم شده است. نمونه کلاسیک با خط ممتد، نمونه گاوسی n_0=۶۵۰ با خط‌چین، نمونه گاوسی n_0=۸۵۰ با نقطه‌چین و نمونه گاوسی n_0=۱۰۰۰ با خط-نقطه نشان داده شده است. در شکل ۳ شبیه‌سازی توزیع شدت محوری به ازای r=۰ بر حسب فاصله محوری از نمونه، برای سه نمونه گاوسی و نمونه کلاسیک ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۴ شبیه‌سازی توزیع شدت عرضی سه نمونه گاوسی و نمونه کلاسیک در صفحه کانونی اصلی ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند. توزیع شدت محوری در شکل ۳ نسبت به کانون اصلی(z=۹۱۵mm) تقارن ندارد و نمونه‌های گاوسی بعد از کانون اصلی یک پیک کوچکتر به شکل زانو دارند. در شکل ۴ توزیع شدت عرضی در صفحه کانونی به علت تقارن محوری(رابطه توزیع فازی تنها تابع شعاع است و متغیر زاویه‌ای سمتی ندارد) در توزیع فازی، نسبت به محور اپتیکی(r=۰) دارای تقارن است. در شکل ۵ نمودار تابع انتقال اپتیکی بهنجار[9](OTF) سه نمونه گاوسی و نمونه کلاسیک با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۲: مقایسه چگالی روزنه‌های APS: اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط-چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط-نقطه).



شکل ۳: شبیه‌سازی عددی توزیع شدت محوری، اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط‌چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط نقطه).



شکل ۴: شبیه‌سازی عددی توزیع شدت عرضی، اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط-

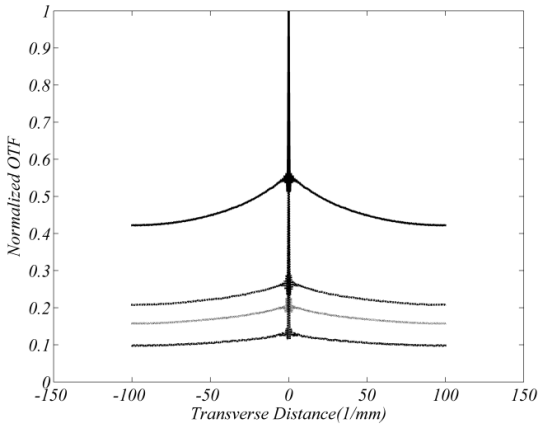
[9] Optical transfer function

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط نقطه).

۳-نتایج تجربی

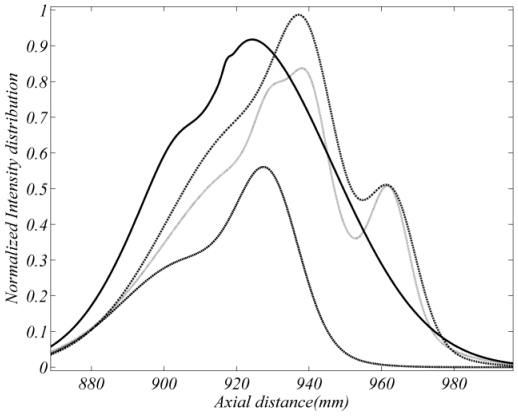
آزمایش با چیدمان تصویرگیری همدوس و با منبع نور لیزر جامد GA-As در طول موج ۶۳۵nm انجام شد. ابتدا نور به کمک فیلتر فضایی صاف و پهن شد و نور پهن شده با یک عدسی محدب به فاصله کانونی ۱m تخت شد. سپس به وسیله CCD[10] از فاصله ۸۷۰ تا ۹۹۵ میلی‌متر در فواصل ۱ میلی‌متری تصویر تهیه شد. از تصاویر تهیه شده به وسیله CCD برای ترسیم نمودارهای توزیع شدت محوری و عرضی و تعیین عمق کانونی استفاده شد. در شکل ۶ توزیع شدت محوری تجربی سه نمونه گاوسی و نمونه کلاسیک با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۷ توزیع شدت عرضی تجربی سه نمونه گاوسی و نمونه کلاسیک در صفحه کانونی اصلی ترسیم و با هم مقایسه شده‌اند.



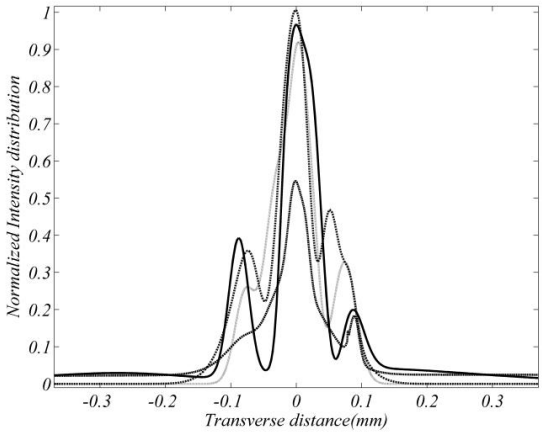
شکل ۵: محاسبه عددی تابع انتقال اپتیکی بهنجار(OTF)، اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط-چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط نقطه).

۴-نتیجه‌گیری

با مقایسه نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی، تطابق نتیجه نسبی در تراز نمایه‌های محوری و عرضی توزیع شدت برقرار است که به نوبه خود فرضیات اولیه در طراحی و نتایج محاسبات را تایید می‌کند. با توجه به تغییرات شعاعی نمودار تابع انتقال(شکل ۵)، نمونه‌های اکسیلن بر پایه غربال فوتونی با توزیع گاوسی، فرکانسهای فضایی بالاتر را بهتر فیلتر می‌کند. رهیافت برای جبران افت شدت غربال فوتونی در این مقاله، استفاده از توزیع گاوسی حفره‌ها بود که با فیلتر کردن فرکانس‌های فضایی بالا، شدت را در پیک مرکزی افزایش داده و پیکهای ثانویه را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب ضمن افزایش چگالی روزنه‌ها و افزایش شدت، قدرت تفکیک نمونه‌های اکسیلن بر پایه غربال فوتونی با توزیع گاوسی نسبت به توزیع کلاسیک بهبود نسبی پیدا می‌کند. اختلاف رفتار نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی به علت خطاهای حین ساخت نمونه‌ها و ابراهی جزئی در چیدمان آزمایشگاهی است.



شکل ۶: توزیع شدت محوری تجربی، اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط‌چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط نقطه).



شکل ۷: توزیع شدت عرضی تجربی، اکسیلن بر پایه‌ی غربال فوتونی با توزیع کلاسیک(خط ممتد)، توزیع گاوسی با n_0=۶۵۰ (خط‌چین)، توزیع گاوسی با n_0=۸۵۰ (نقطه‌چین)،توزیع گاوسی با n_0=۱۰۰۰ (خط نقطه).

۵-مراجع

[1] L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson, R. Berndt, R. Adelung, S. Harm and R. Seemann "Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves," *Nature* 414 (6860), 184-188, (2001) .

[2] J. H. McLeod, ''The Axicon: A New Type of Optical Element,'' J. *Opt. Soc.* Am. 44, 592 (1954).

[3] N. Davidson, A. A. Friesem, and E. Hasman, ''Holographic axilens: high resolution and long focal depth,'' *Opt. Lett.* **16**, 523–525 ~1991.

[۴] ثباتیان، آرش ؛ حسینی، سید اکبر ، طراحی اکسیلن بر پایه غربال فوتونی، نوزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران به همراه پنجمین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، بهمن ۹۱

[5] Soifer, V.A ., Computer design of diffractive optics, Oxford cambridge Philadelphia New Delhi, 2013.

[6] Voelz, David George, Computational fourier optics : a MATLAB tutorial, SPIE P.O. Box 10, Bellingham, Washington, 2011.

[10] Charged couple display

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]