بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مطالعه ی خواص کانونی مدل ارتقاء یافته ای از تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل با قدرت تفکیک تصحیح شده

آرش ثباتیان ، الناز پیرضیائی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

چکیده – به علت محدودیت تکنیکی در ساخت تیغه‌های منطقه‌ای فرنل با قطرهای بزرگتر، این قطعات قابل تولید نیستند. در این کار روشی را معرفی می‌کنیم که در آن با ثابت بودن فاصله‌ی کانونی، تیغه‌ی منطقه‌ای با قطر بزرگتر را تولید کرده که منجر به ایجاد تیغه‌ی منطقه‌ای تصحیح یافته می‌شود که قدرت تفکیک بالاتری نسبت به قطعه‌ی قبلی دارد.

کلید واژه- پرتو گاوسی، توزیع شدت، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل، حلقه‌های روشن، قدرت تفکیک

Study of the focal properties of Fresnel zone plate's enhanced model with corrected resolution

Arash Sabatyan , Elnaz Pirziaei

Department of Physics, Faculty of Science, Urmia university, Urmia

Abstract- Due to technical limitations in production of Fresnel zone plate with larger diameter, these parts are not producible. In this article, we introduce a method in which, with fixed focal length produces a zone plate with larger diameter, which leads to modified Fresnel zone plate that its resolution is higher than the previous piece.

Keywords: Gaussian beam, Intensity Distribution, Fresnel zone plate, bright rings, Resolution

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

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

۱- مقدمه

کانونی‌کردن و تصویربرداری اشعه‌ی ایکس، دارای کاربرد های زیادی در علم فیزیک و زندگی روزمره است. از جمله کاربرد های آن می‌توان به اسپکتروسکوپی، نانولیتوگرافی، پزشکی، صنعت و میکروسکوپی با وضوح بالا و ... اشاره کرد. برای رسیدن به این هدف، نمی‌توان از عدسی‌های شکستی استفاده کرد. زیرا در ساخت این عناصر، از مواد جامد استفاده شده است و این مواد در این ناحیه‌ی طول موجی، تحت سه مکانیزم فتوالکتریک، اثر کامپتون و جفت‌شدگی باعث جذب پرتو می‌شوند. بنابراین برای رفع این مشکل، به‌کارگیری عدسی‌های پراشی که بر پایه‌ی اصل پراش طراحی و ساخته می‌شوند، پیشنهاد شده است[۱]. طرح های مختلفی برای جایگزینی عدسی‌های پراشی به جای عدسی‌های شکستی ارائه شده است. اولین نمونه از این عناصر، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل است. این عنصر به دلیل وزن و حجم کم، ارزان بودن، ساخت آسان، انعطاف‌پذیری و قابلیت ترکیب با سایر عناصر اپتیکی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اما قدرت تفکیک این عنصر پراشی، به‌وسیله کوچکترین ساختاری که می‌توان در لیتوگرافی ساخت(۴۰-۲۰ نانومتر) محدود می‌شود[۲]. برای رفع این عیب و بدست آوردن پرتو گاوسی با کمترین پهنا و ماکزیمم مرکزی با شدت بالا، طرح جدیدی از تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است که در آن پهنای نوارهای روشن تغییر یافته است. بنابراین این قطعه، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح یافته[1] نامیده می‌شود.

۲- تئوری و شبیه سازی

یک MFZP با N حلقه‌ی روشن هم مرکز درنظرگرفته می‌شود.(شکل۱) از انتگرال پراش ریلی- سامرفیلد می‌توان نوشت[1]:

$$U_n(R)=\frac{1}{\lambda}\iint_{A_n}\frac{f}{\rho^2}\exp(jk\rho)rdrd\theta, \qquad (۱)$$

به طوریکه $k=2\pi/\lambda$ ، λ طول موج ، A_n مساحت n امین حلقه‌ی روشن و $\rho=[f^2+R^2+r^2-2Rr\cos(\theta-\phi)]^{1/2}$ است. با استفاده از تقریب بسل، معادله‌ی میدان پراشی در نقطه‌ی R به صورت زیر بدست می‌آید:

$$U_n(R)=\frac{2f}{f_n}\exp\left[jk\left(f_n+\frac{R^2}{2f_n}\right)\right]J_0\left(\frac{kr_n}{f_n}R\right)\sin\left(\frac{kd_n}{2f_n}\right). \qquad (۲)$$

d_n نیم‌پهنای n امین حلقه‌ی روشن درمختصات s است. به‌طوریکه $s=r^2$. b_n, a_n به‌ترتیب شعاع لبه‌ی پایینی و بالایی n امین حلقه‌ی روشن است و $a_n^2=s_n-d_n$ و $b_n^2=s_n+d_n$ به طوریکه $s=s_n$ نقطه‌ی میانی انتگرال در مختصات s است. برای شرایط خاص $U_n(0)$ در شعاع R=0 مقدار میدان به صورت زیر است:

$$U_n(0)=\frac{2f}{f_n}\exp(jkf_n)\sin\left(\frac{kd_n}{2f_n}\right). \qquad (۳)$$

شروط تداخل سازنده و ویرانگر برای نوارهای روشن MFZP به ترتیب به صورت زیر است:

$$f_n=f+m_n\lambda \qquad \sin\left(\frac{kd_n}{2f_n}\right)>0, \qquad (۴)$$

$$f_n=f+\left(m_n+\frac{1}{2}\right)\lambda \qquad \sin\left(\frac{kd_n}{2f_n}\right)<0,$$

m_n مقدار صحیح نامنفی است. ایجاد یک نقطه‌ی کانونی گاوسی ارزشمند است چرا که مزیت هایی ازجمله نداشتن بیشینه های ثانویه، تقارن‌کروی، عمق کانونی زیاد و کیفیت پرتویی بالا را دارد. بنابراین میدان پراشی کل در صفحه‌ی کانونی با پهنای پرتویی $2F/(K\sigma)$ به صورت زیر است:

$$U(R)\approx\alpha\sigma^2\exp\left[-\left(\frac{\sigma kR}{2F}\right)^2\right] \qquad (۵)$$

این رابطه صراحتاً نشان دهنده یک پرتو گاوسی است. برای برقراری رابطه‌ی بالا، شرط زیر باید برای هر حلقه‌ی روشن صدق کند:

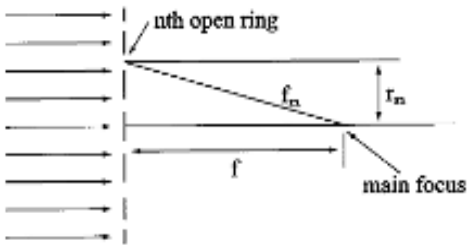
$$\beta D_n f_n\exp\left[-(s_n-s_1)/\sigma^2\right]/(D_1f_1)\le 1 \qquad (۶)$$

همچنین رابطه‌ی $\exp(-A^2/\sigma^2)<<1$ باید برقرار باشد.بنابراین $\beta=0.96$ و $\sigma=R/2$. حال برای طراحی تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح یافته، تعداد کل حلقه‌ها به سه ناحیه تقسیم شده و برای حلقه‌های روشن در هر

[1] Modified Fresnel zone plate (MFZP)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

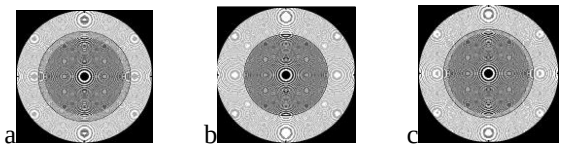
ناحیه پهنای مشخصی درنظرگرفته می‌شود به این صورت که ضریب صحیحی از پهنای نوارهای روشن FZP [۲] باشند. پهنای باریک‌ترین نوار که همان آخرین نوار ناحیه۱ است، به علت محدودیت چاپ، ۴۰ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود.



شکل۱: طرحی از یک تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح یافته

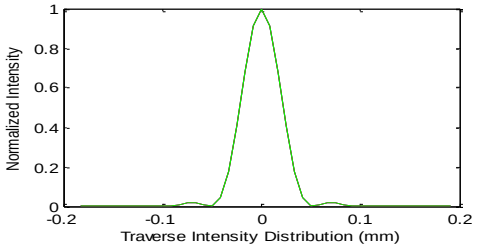
۳- کار آزمایشگاهی

شبیه سازی کار توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. در ابتدا نمونه‌هایی از MFZP به قطر ۲۵ میلی‌متر با فاصله‌ی کانونی ۵۰۰ میلی‌متر و ۲۴۷ حلقه‌ی روشن شبیه‌سازی شد. با تقسیم کل نوارهای روشن به سه ناحیه و تعیین تعداد نوارهای مشخص برای این سه ناحیه، نمونه‌های طراحی شده به صورت زیر حاصل شد. سپس لیتوگرافی با دستگاهی با رزولوشن dpi ۲۴۰۰ انجام گرفت. این نمونه‌ها در آزمایشگاه تحت چیدمان خاصی در برابر نور هلیم- نئون با طول موج ۶۳۲.۸ نانومتر قرار گرفت و در نهایت توزیع شدت حاصل ازآنها توسط CCD ثبت شد.

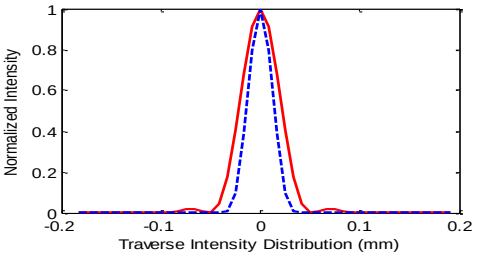


شکل۲: تصویر مربوط به سه نمونه‌ی شبیه‌سازی شده. تعداد حلقه‌های روشن در سه ناحیه، برای این سه نمونه متفاوت است.

برای هر سه نمونه فاصله‌کانونی ۵۰۰ میلی‌متر وقطر ۲۵ میلی‌متراست. تعداد حلقه‌های روشن نمونه a برای نواحی ۲،۱ و۳ به ترتیب ۴۲ ،۱۰ و۲۷ است.نمونهb ۲،۴۲و۳۲و نمونه c،۴۲،۲۰و۲۱ نوار روشن برای‌سه‌ناحیه دارد. برای این نمونه‌ها پهنای نوارهای‌روشن به صورت ۴،۶و۱۰ در نظر گرفته شده است. نمودار توزیع شدت عرضی این نمونه‌ها در شکل ۳ رسم شده که کاملاً روی هم منطبق شده اند. برای مقایسه، پهنای نوارهای روشن MFZP را تغییر داده و این بار به صورت۴،۶و۸ در نظر می‌گیریم. توزیع شدت عرضی برای این نمونه در مقایسه با حالت قبلی، در شکل ۴ رسم شده است.

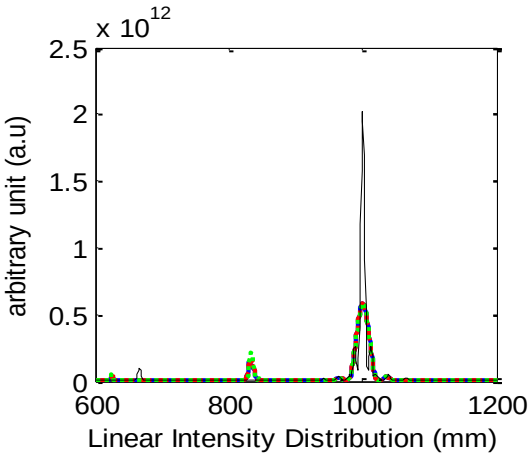


شکل۳: توزیع شدت عرضی در صفحه کانون (میلی‌متر)



شکل۴:توزیع‌شدت عرضی در صفحه کانون(میلی‌متر). نمودار خط‌چین مربوط به پهنای۴،۶و۸و نمودار با خط صاف مربوط به پهنای ۴،۶و۱۰ MFZP است. پهنای این پرتوگاوسی‌به ترتیب۶۵و۱۰۰میکرومتر است.

در شکل ۵، نمودار توزیع شدت طولی این ۴نمونه باهم مقایسه شده است. نمودار با رنگ قرمز،آبی و سبز مربوط به پهنای ۴،۶ و۱۰ و نمودار مشکی رنگ مربوط به پهنای ۴، ۶و ۸ MFZP است. شدت برای نمونه‌ی با پهنای ۴، ۶و۸ بیشتر از سایر نمونه‌ها است.



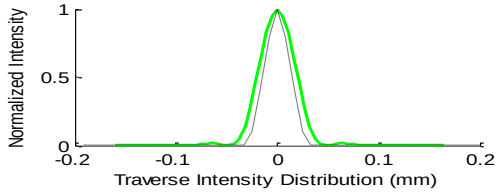
شکل۵: توزیع شدت طولی در صفحه کانون(میلی‌متر)

شکل۶ نمودار توزیع شدت عرضی مربوط به FZP و MFZP با پهنای ۴ ،۶و۸ را نشان می‌دهد. برای هر دو

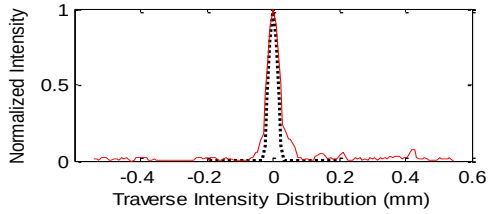
[2] W_n

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

نمونه فاصله‌ی تصویر برداری ۱۰۰۰ میلی‌متر و اندازه‌ی مشخصه‌ی باریک‌ترین نوار روشن ۴۰ میکرومتر درنظر گرفته شده است. قطر نمونه‌ها مقداری است که این هدف را برآورده سازد. بنابراین قطر FZPو MFZP به ترتیب ۱۶و ۲۵ میلی‌متر فرض شده است.



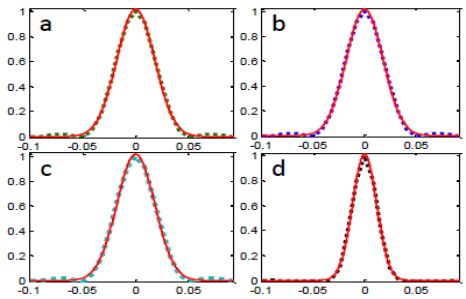
شکل۶ : توزیع شدت عرضی در صفحه‌ی کانون(میلی‌متر). نمودار خط چین مربوط به MFZP با پهنای ۴ ،۶و۸ و نمودار با خط صاف مربوط به FZP است. پهنای این پرتو گاوسی به ترتیب ۶۵ و ۹۶ میکرومتر است.



شکل ۷: توزیع شدت عرضی در صفحه کانون(میلی‌متر). نمودار خط‌چین مربوط به پهنای ۴ ،۶و۸ MFZP درکار شبیه‌سازی و نمودار باخط‌صاف مربوط به همین نمونه در کار تجربی است.

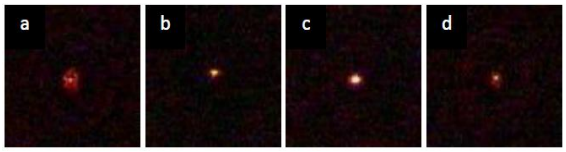
نمودار بالانتیجه کار شبیه‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد که باتوجه به پهنای ۶۵میکرومتری،با هم، هم‌خوانی دارند. شکل ۸ تطابق طرح پرتو گاوسی نمونه‌های شبیه‌سازی شده بانمودار پرتوگاوسی تعریف شده بارابطه‌ی زیر را نشان می‌دهد.

$$f(x) = a1 \times \exp(-((x-b1)/c1)^2) \qquad (۷)$$



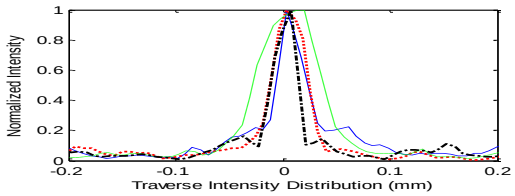
شکل۸ : نمودارهای سبز، آبی و مشکی رنگ مربوط به نمونه‌های طراحی شده و نمودارهای قرمز رنگ مربوط به رابطه‌ی بالا هستند. محور افقی توزیع شدت عرضی بر حسب میلی‌متر و محور عمودی شدت نرمالیزه شده را نشان می‌دهد.

شکل۹، توزیع شدت ثبت شده توسط CCD را برای نمونه ها نشان می‌دهد.



شکل۹: توزیع شدت ثبت شده از نمونه‌ها. a, b و c مربوط به نمونه‌های با پهنای ۴،۶و۱۰و تصویر d مربوط به نمونه‌ی با پهنای ۴،۶و۸ است.

نمودار توزیع شدت عرضی برای نتایج تجربی به صورت زیر بدست می‌آید.



شکل۱۰: توزیع شدت عرضی در صفحه کانون (میلی‌متر). رنگ مشکی مربوط به پهنای ۴،۶و۸ در کار تجربی است که دارای پهنای ۴۴ میکرومتر است. پهنای نمودار آبی رنگ حدوداً ۴۶ میکرومتر است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که در یک فاصله کانونی و قطر مشخص،برای پهنای ۴،۶و۸ MFZP ، پهنای پرتو گاوسی کمتر از پهنای ۴،۶و۱۰ MFZP است. با مقایسه‌ی FZP و پهنای ۴،۶و۸ MFZP مشاهده می‌شود که پهنای ماکزیمم مرکزی در MFZP کاهش یافته است. با کم شدن قطر لکه‌ی مرکزی، کانون تیزتر شده و ماکزیمم های ثانویه هم حذف می‌شوند. در نتیجه می‌توان با ثابت بودن فاصله‌ی کانونی، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنلی با قطر بزرگتر را ساخت به طوریکه قدرت تفکیک بالاتری نسبت به FZP داشته باشد.

مراجع

[1] Q. Cao and J. Jahns, *Modified Fresnel zone plates that produce sharp Gaussian focal spots*, J. **Opt. Soc**. Am. A/Vol. 20,No. 8/August, 1576-1581 (2003).

[2] E. H. Anderson, V. Boegli, and L. P. Muray, *Electron beam lithography digital pattern generator and electronics for generalized curvilinear structures*, J. **Vac. Sci**. Technol. B 13, 2529–2534 (1995).

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]