



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



مطالعه‌ی خواص کانونی غربال فوتونی تصحیح شده

آرش ثباتیان، هاله ابراهیمی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه

چکیده – ما برای افزایش قدرت تفکیک تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل روشی را با تغییر دادن مناطق فرنل مطرح می‌کنیم. در این روش مناطق فرنل به نواحی با پهناهای متفاوت تقسیم شده که هر ناحیه شامل یک نوار روشن است. سپس توزیعی مناسب از حفره‌ها جایگزین نوارهای روشن شده که منجر به ایجاد غربال فوتونی تصحیح شده می‌شود. خواص کانونی آن به صورت گسترده هم به صورت شبیه‌سازی و هم به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. وضوح تصویر این عدسی به خوبی اصلاح شده و کانون‌های ثانویه متوقف می‌شوند.

کلید واژه- تفکیک پذیری، تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل، حفره ، قطر ، کانون های ثانویه

Study of focusing properties of modified photon sieve

Sabatyan, Arash; Ebrahimi, Haleh

Department of physics, Faculty of science, Urmia university ,Urmia

Abstract-We propose a method to increase resolution of a Fresnel zone plate by modulating Fresnel zones .In this method, Fresnel zones plate is divided into zones with different widths that each zone include an open ring. Then the open rings are replaced by a give distribution of pinholes which leads to modified photon sieve. Its focusing properties are broadly investigated by simulation and verified by experiments. Resolution of this lens is modified well as well as the Secondary foci are suppressed.

Keywords: diameter, Fresnel zone plate, pinhole, resolution, secondary foci

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

۱- مقدمه

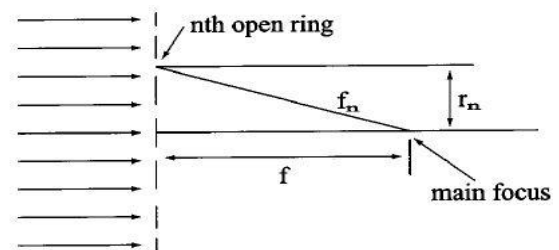
تصویرگیری و کانونی کردن اشعه‌ی X کاربردهای زیادی در علم فیزیک و زیست دارد. برای این منظور از عدسی‌های شکستی به علت جذب اشعه نمی‌توان استفاده کرد. برای برای فایق آمدن بر این مشکل از عدسی‌های پراشی استفاده می‌شود. اولین عدسی پراشی طراحی و ساخته شده تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل است که شامل حلقه‌های روشن و تاریک متحدالمرکز است. راه‌های زیادی برای بالا بردن بازده پراشی و در نتیجه قدرت تفکیک این لنز وجود دارد که یکی از این راه‌ها طراحی عدسی با قطر بزرگتر است. چون طبق معیار ریلی، لنز با قطر بزرگتر قدرت تفکیک بیشتری دارد [۱]. این افزایش قطر به علت محدودیت در چاپ با لیتوگرافی، امکان پذیر نمی‌باشد. علاوه بر افزایش قطر با جایگزین کردن روزنه‌ها به جای نوارهای روشن نیز می‌توان بازده پراشی تیغه‌ی منطقه‌ای را افزایش داد که عدسی طراحی شده غربال فوتونی نام دارد [۲]. در این مقاله هم افزایش قطر لنز و هم جایگزینی روزنه به جای نوار روشن بحث می‌شود.

۲- تئوری

یک تیغه‌ی منطقه‌ای با N حلقه‌ی روشن هم مرکز (شکل ۱) در نظر می‌گیریم. با استفاده از انتگرال پراش ریلی - سامرفیلد می‌توان نوشت [۱]:

$$U_n(R) = \frac{1}{\lambda} \iint_{A_n} \frac{f}{\rho^2} \exp(jk\rho) r dr d\theta \quad (1)$$

که در آن $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ، A_n مساحت n امین نوار حلقه‌ی روشن و $\rho = [R^2 + f^2 + r^2 + 2Rr \cos(\theta - \phi)]^{1/2}$ است.



شکل ۱: طرحی شماتیک از تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده [۱].

با انتگرال گیری و استفاده از تقریب بسل می‌توان میدان پراش یافته در نقطه‌ی (R) را به صورت زیر نوشت: (۲)

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

d_n نیم پهنای هر نوار روشن در مختصات S است. برای کانونی شدن موثر میدان‌ها، باید میدان‌های پراش یافته از هر نوار روشن در نقطه‌ی کانون هم فاز باشند. آرگومان مقدار حقیقی $\sin 0$ یا π است. در نتیجه برای داشتن مقدار مثبت میدان برای f_n موقعیت‌های زیر خواهد بود:

$$f_n = f + m_n \lambda \quad \sin \left(\frac{kd_n}{2f_n} \right) > 0 \quad (3)$$

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

m_n مقدار صحیح مثبت است. با استفاده از معادلات ۳ می‌توان نقاط میانی هر نوار روشن و نیم پهنای هر نوار را به دست آورد. نقطه‌ی کانونی گاوسی دارای مزیت‌هایی چون تقارن کروی، عمق کانونی زیاد و بالا بودن کیفیت پرتو است. برای داشتن پرتو گاوسی در کانون کل المان عدسی را به N تا ناحیه تقسیم کرده و پهنای هر ناحیه را برابر D_n قرار می‌دهیم. می‌توان نوشت:

$$\frac{2f}{f_n} \exp[jk(f_n - f)] \sin \left(\frac{kd_n}{2f_n} \right) = \alpha D_n \exp \left(-\frac{s_n}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

با محاسبات انجام شده، می‌توان میدان پراشی کل در صفحه‌ی کانون را به صورت زیر به دست آورد [۱]:

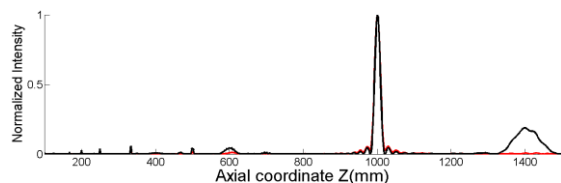
$$U(R) \approx \alpha \sigma^2 \exp \left[-\left(\frac{\sigma k R}{2F} \right)^2 \right] \quad (5)$$

که در این معادله F میانگین تمامی f_n ها است. میدان پراش یافته به صورت گاوسی با پهنای $\frac{2F}{\sigma k}$ در نقطه‌ی کانون به دست می‌آید. با استفاده از معادلات ۳ و ۴ و ۵ می‌توان نیم پهنای نوارهای روشن را به دست آورد.

$$d_n = \frac{2f_n}{k} \left\{ L\pi - a \sin \left[\beta \frac{D_n f_n}{D_1 f_1} \exp \left(-\frac{s_n - s_1}{\sigma^2} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

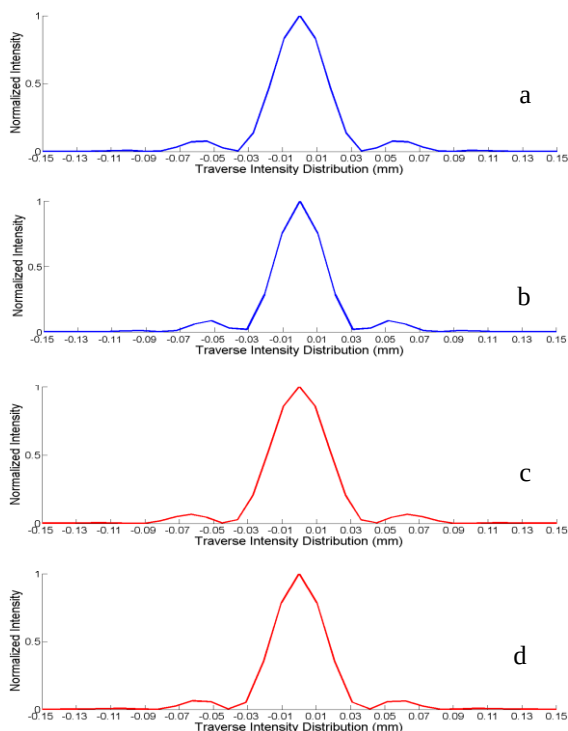
که L یک مقدار حقیقی مثبت است که برای L های فرد مقدار $\sin$ بزرگتر از صفر است و برای L های زوج مقدار $\sin$ کوچکتر از صفر است. برای اینکه نور پراشیده شده از لب‌ها متوقف شود مقدار β را تقریباً برابر نصف شعاع عدسی مورد نظر قرار می‌دهیم. پارامتر β باید مقدار بین صفر و یک را به خود بگیرد. با در دست داشتن نقاط میانی و نیم پهنای هر نوار، لب‌های بالایی و پایینی هر نوار روشن به دست می‌آید که می‌توان تیغه‌ی منطقه‌ای

می‌دهد.



شکل ۴: نمودار مشکی مربوط به توزیع شدت در راستای محور Z برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده است. نمودار قرمز توزیع شدت در راستای محور Z برای غربال فوتونی تصحیح شده است.

توزیع شدت در نقطه‌ی کانون برای هر چهار عدسی در شکل ۵ نشان داده می‌شود.



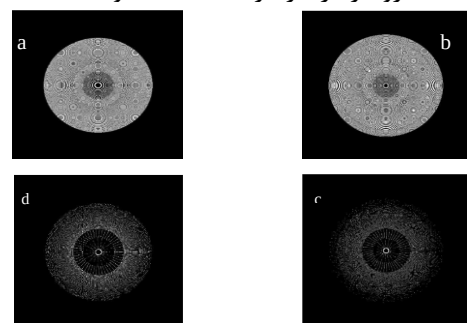
شکل ۵: a, b توزیع شدت در نقطه‌ی کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده با شعاع‌های به ترتیب ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر است. c, d توزیع شدت در نقطه‌ی کانون غربال فوتونی تصحیح شده به ترتیب با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر است.

پهنای پرتو در نقطه‌ی کانون برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۹.۷۶ و ۱۸.۲۳ میکرومتر و برای غربال فوتونی تصحیح شده با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر به ترتیب ۲۱.۵۵ و ۱۹.۷۶ میکرومتر به دست می‌آید. نتایج به دست آمده را با تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی با کانون ۱۰۰۰ میلی‌متر و کوچکترین پهنای نوار ۴۰ میکرومتر مقایسه می‌کنیم که در شکل ۶ تصویر نقطه‌ی کانون و توزیع شدت آن آورده شده است.

فرنل تصحیح شده را داشت. حال توزیع چگالی از حفره‌ها جایگزین نوارهای روشن تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل می‌شود. قطر حفره‌ها با پهنای نوارهای روشن برابر است که با داشتن قطر روزنه‌ها غربال فوتونی تصحیح شده طراحی می‌شود [۳]. در واقع در هر ناحیه تعداد معینی حفره قرار داده می‌شود.

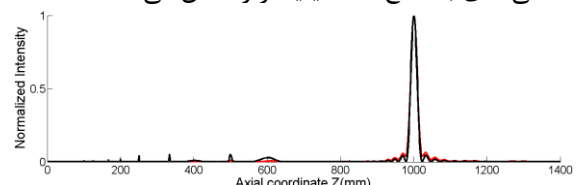
۳- شبیه سازی

کار شبیه سازی با برنامه‌ی MATLAB انجام شده است. برای طراحی ابتدا کل المان عدسی را به سه منطقه تقسیم کرده و پهنای نواحی مناطق اول، دوم و سوم به ترتیب برابر $4W_n$ ، $6W_n$ و $10W_n$ در نظر گرفته می‌شود. W_n پهنای نوارهای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل است. با در نظر گرفتن فاصله‌ی کانونی ۲۰۰ میلی‌متر و طول موج ۶۳۲.۸ نانومتر برای دو شعاع ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده و غربال فوتونی تصحیح شده شبیه سازی شدند. تعداد نوارهای منطقه‌ی اول عدسی ها با پهنای آخرین نوار روشن این منطقه که ۴۰ میکرومتر در نظر گرفته شده محدود شده است.



شکل ۶: a, b مربوط به تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده به ترتیب با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر. c, d مربوط به غربال فوتونی تصحیح شده به ترتیب با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر.

شکل ۳ توزیع شدت در راستای محور Z برای برای عدسی های با شعاع ۸.۵ میلی‌متر را نشان می دهد.

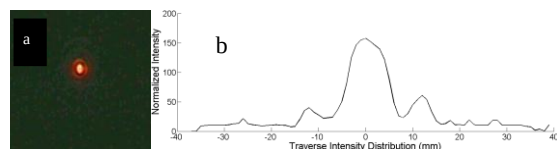


شکل ۳: نمودار مشکی توزیع شدت در راستای محور Z برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده را نشان می دهد. نمودار قرمز توزیع شدت در راستای محور Z غربال فوتونی تصحیح شده را نشان می‌دهد.

شکل ۴ توزیع شدت در راستای محور Z برای هر دو عدسی تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل و غربال فوتونی را نشان

در نقطه‌ای کانون غربال فوتونی تصحیح شده با شعاع ۱۰.۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی با کانون ۱۰۰۰ میلی‌متر هم تصویر نقطه‌ای کانون ثبت شده و توزیع شدت آن به دست آمده است که در شکل ۹ نشان داده می‌شود.



شکل ۹: a: نقطه‌ای کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی، b: توزیع شدت در نقطه‌ای کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی

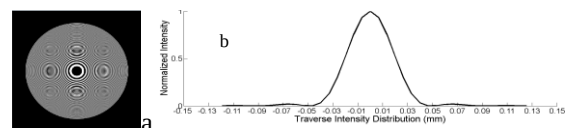
پهنای پرتو در نقطه‌ای کانون برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر به ترتیب برابر ۲۳.۸۵ و ۲۰.۳۴ میکرومتر و برای غربال فوتونی تصحیح شده با شعاع‌های ۸.۵ و ۱۰.۵ میلی‌متر به ترتیب برابر ۲۵.۹۴ و ۲۲.۴۰ میکرومتر به دست آمده است. برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی پهنای کانون ۲۸.۱۰ میکرومتر به دست آمده است.

۵- نتیجه گیری

با افزایش شعاع پهنای پرتو در نقطه‌ای کانون در شبیه سازی به ترتیب برای تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده و غربال فوتونی تصحیح شده در مقایسه با تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی ۲۳.۲۷ و ۱۶.۸۳ درصد کاهش می‌یابد و در تجربی کاهش پهنای در مقایسه با تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی برای تیغه‌ی منطقه‌ای تصحیح شده و غربال فوتونی به ترتیب ۲۷.۶۲ و ۲۰.۲۸ درصد است. نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی مطابقت می‌کند و با افزایش شعاع کاهش پهنای و افزایش قدرت تفکیک را خواهیم داشت. در غربال فوتونی تصحیح شده کانون‌های ثانویه نیز متوقف شده‌اند.

مراجع

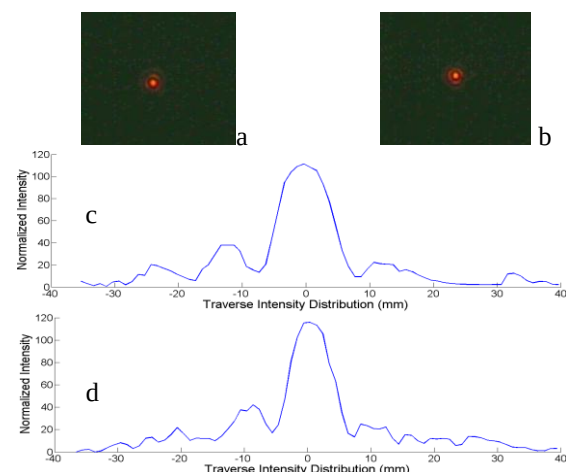
- [1] Q. Cao and J. Jahns, "Modified Fresnel zone plates that produce sharp Gaussian focal spots," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 20, No. 8/August, 1576-1581 (2003).
- [2] L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson, R. Brendt, R. Adelung, S. Harm and Seemann, "Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves," *Nature* 414 (6860), 184-188, (2001)
- [3] sabatyan. A, Roshaninejad. P, "super-resolving random-Gaussian apodized photon sieve," *Appl. Opt.* 51, 6315 - 6318 (2012).



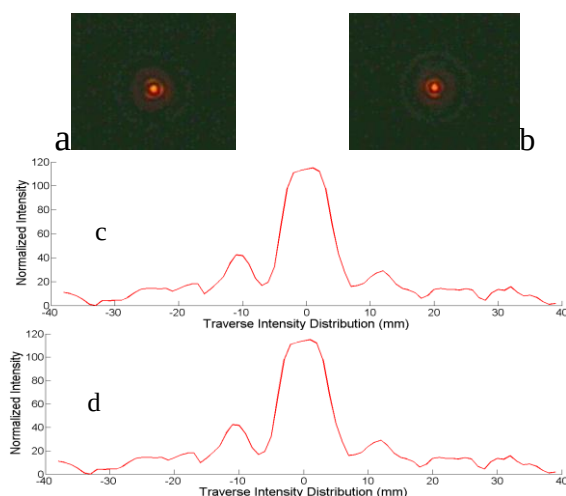
شکل ۶: a: نقطه‌ای کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی، b: توزیع شدت در نقطه‌ای کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل عادی

۴- نتایج تجربی

در آزمایشگاه این نمونه‌های طراحی شده در برابر نور لیزر با طول موج ۶۳۲.۸ نانومتر قرار داده شده و تصاویر نقاط کانون با دوربین ثبت شده است. شکل‌های ۷ و ۸ تصاویر نقاط کانونی ثبت شده و توزیع شدت مربوط به آن‌ها را نشان می‌دهند.



شکل ۷: a, c: نقطه‌ای کانون و توزیع شدت در کانون تیغه‌ی منطقه‌ای فرنل تصحیح شده با شعاع ۸.۵ mm. b, d: نقطه‌ای کانون و توزیع شدت در کانون تیغه‌ی منطقه‌ای تصحیح شده با شعاع ۱۰.۵ mm



شکل ۸: a, c: نقطه‌ای کانون و توزیع شدت در کانون غربال فوتونی تصحیح شده با شعاع ۸.۵ mm. b, d: نقطه‌ای کانون و توزیع شدت