



پانزدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران  
همراه با  
نخستین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران، دانشگاه اصفهان  
۱۰-۸ بهمن ماه ۱۳۸۷  
15<sup>th</sup> Iranian Conference on Optics and Photonics and  
1<sup>st</sup> Iranian Conference on Photonics Engineering  
University of Isfahan, 27-29 January 2009.



## دقت روش تنها-فاز در طراحی ریز عدسی‌ها

<sup>۱,۲</sup> سیدحسین کاظمی ریایی، <sup>۱</sup> میرمجتبی میرصالحی، <sup>۱</sup> امیررضا عطاری

<sup>۱</sup> گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

<sup>۲</sup> مرکز پژوهشی مخابرات و کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده - روش تنها فاز (POA) به عنوان یک روش متداول در تحلیل و طراحی عناصر نوری پراشی (DOEs) استفاده می‌شود. ما ابتدا چند ریز عدسی با فواصل کانونی مختلف را بر مبنای این روش طراحی کردیم سپس دقت طرح‌ها را به وسیله روش تفاضل-محدود حوزه زمان سه بعدی (FDTD) با شرط مزری جاذب لایه کاملاً منطبق (PML) ارزیابی نمودیم. نتایج ارزیابی نشان داد که وقتی میانگین فواصل پخش فاز در ریز عدسی از  $2/5$  برابر طول موج بیشتر باشد، روش تنها-فاز خطای نسبی کمتر از ۲۰٪ در بهره پراش را نشان خواهد داد.

کلید واژه- ریز عدسی، روش تنها-فاز، FDTD، DOE.

کد PACS - ۲۳۰/۰۲۳۰

## Accuracy of Phase Only Approach in Micro-lens Design

<sup>1,2</sup> Seyyed H. Kazemi, <sup>1\*</sup> Mir M. Mirsalehi, <sup>1</sup> Amir R. Attari

<sup>1</sup>Electrical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Communications and Computer Research Center, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

*Phase only approach (POA) is used generally to analyze diffractive optical elements (DOEs) such as micro-lens. This simple approach ignores polarization, internal reflection and resonance phenomena. We used 3-D finite difference time domain (FDTD) with perfect matched layer (PML) absorbing boundary conditions to test several micro-lens that designed based on phase only approach to evaluate the accuracy. If the Phase variation average length is chosen greater than  $2.5\lambda$ , the error is less than 20% in diffraction efficiency.*

**Keywords:** Micro-Lens, Phase Only Approach, FDTD, DOE.

PACS No: 230/0230

## ۱- مقدمه

ترکیبی از دو روش تنها فاز و روش طیف زاویه‌ای می‌باشد. در اینجا روش طیف زاویه‌ای به منظور شبیه سازی پدیده انتشار موج در پشت عنصر نوری پراشی استفاده می‌شود. از آنجایی که روش طیف زاویه‌ای روشی دقیق است، خطا در طراحی تنها به روش تنها-فاز بر می‌گردد. تابع انتقال در این روش برای حالت دوبعدی به صورت زیر است [۶].

$$H(f_x, f_y) = \exp\{jkz[1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)^{\frac{1}{2}}]\} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\lambda$  طول موج نور در محیط انتشار،  $k$  عدد موج،  $z$  فاصله صفحه خروجی عنصر نوری پراشی از صفحه مشاهده،  $j=(-1)^{1/2}$  و  $f_x$  و  $f_y$  فرکانس های فضایی در جهت های  $X$  و  $Y$  هستند. با محاسبه طیف زاویه‌ای میدان در خروجی عنصر و ضرب آن در این تابع، طیف زاویه‌ای میدان در صفحه کانونی محاسبه می‌شود. در صورت عدم انطباق توزیع محاسبه شده با توزیع مطلوب، دامنه میدان تصحیح می‌شود و انتشار به عقب به وسیله عکس تابع انتقال انجام می‌پذیرد و عنصر نوری پراشی با توجه به میدان برگشتی تصحیح می‌شود. این فرایند برای دسترسی به توزیع شدت مطلوب یا برآورده شدن معیار تعریف شده توسط طراح، تکرار می‌شود.

توزیع شدت مطلوب برای ریز عدسی به صورت یک تابع ضربه در صفحه کانونی در نظر گرفته شده است و دسترسی به حداکثر بازده در لوب اصلی (گل برگ اصلی)، معیار تکرار است. این بازده به صورت

$$DE = \frac{\iint_W I(x, y) dx dy}{\iint_{All} I(x, y) dx dy} \quad (2)$$

تعریف شده است. در رابطه بالا  $I$  توزیع شدت محاسبه شده در صفحه کانونی است و پنجره  $W$  منطبق بر سطح لوب اصلی ریز عدسی انتخاب شده است. انتگرال مخرج روی تمام صفحه کانونی محاسبه شده است. ریز عدسی‌ها در مربعی به ابعاد  $10\lambda \times 10\lambda$  ( $\lambda=5\mu m$ ) در یک قطعه سیلیکن به ضریب شکست  $n_2=3.4$  طراحی شده‌اند.

چندین روش برای طراحی عناصر نوری پراشی<sup>۱</sup> (DOEs) استفاده شده است. بسیاری از این روش‌ها از روش تنها فاز<sup>۲</sup> (POA) برای در نظر گرفتن اثر عنصر نوری پراشی بر موج تابشی بهره می‌برند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش شکل دادن برداری پرتو [۱]، روش زاویه چرخش بهینه [۲]، روش گرشبرگ-ساکستون [۳]، روش تبدیل فوریه تکراری [۴] و روش طیف زاویه‌ای تکراری (IASA)<sup>۵</sup> [۵] اشاره کرد. در روش تنها-فاز، تنها اثر عنصر بر فاز موج تابشی در نظر گرفته می‌شود و از تغییرات دامنه، اثر قطبش، انعکاسات داخلی و پدیده تشدید چشم پوشی می‌شود. این چشم پوشی‌ها برای عنصری با اجزای بزرگ نسبت به طول موج، قابل پذیرش است، اما وقتی اندازه اجزاء عنصر کوچکتر می‌شوند، دقت را کاهش داده و در ابعاد بسیار کوچک، روش را نامعتبر می‌کنند.

از آنجا که کاربرد عناصر نوری پراشی بسیار متنوع است، بررسی دقت روش تنها-فاز برای همه آنها ممکن نیست. در اینجا ما ساختار ریز عدسی را که پیچیدگی کمتری نسبت به سایر ساختارها دارد انتخاب نموده‌ایم. پارامتر کلیدی در طراحی ریز عدسی فاصله کانونی آن است، حال آنکه ساختارهایی مانند منشعب کننده‌های پرتو<sup>۶</sup> یا شکل دهنده‌های پرتو<sup>۵</sup> با پارامترهای بیشتری درگیر هستند.

در بخش‌های ۲ و ۳ دقت چند ریز عدسی را که با استفاده از روش طیف زاویه‌ای تکراری طراحی شده‌اند با استفاده از روش تفاضل-محدود حوزه زمان<sup>۶</sup> (FDTD) با شرط مرزی جاذب لایه کاملاً منطبق<sup>۷</sup> (PML)، ارزیابی نموده‌ایم. بخش آخر را نیز به نتیجه گیری اختصاص داده‌ایم.

## ۲- طراحی ریز عدسی

روش طیف زاویه‌ای تکراری در مرحله تحلیل شامل

<sup>1</sup> Diffractive Optical Elements

<sup>2</sup> Phase Only Approach

<sup>3</sup> Iterative Angular Spectrum Approach

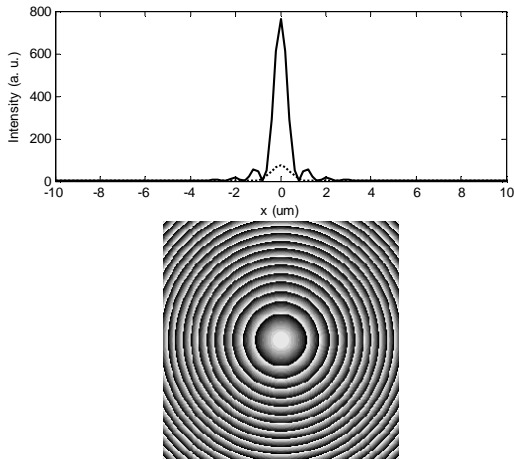
<sup>4</sup> Beam fanners

<sup>5</sup> Beam shapers

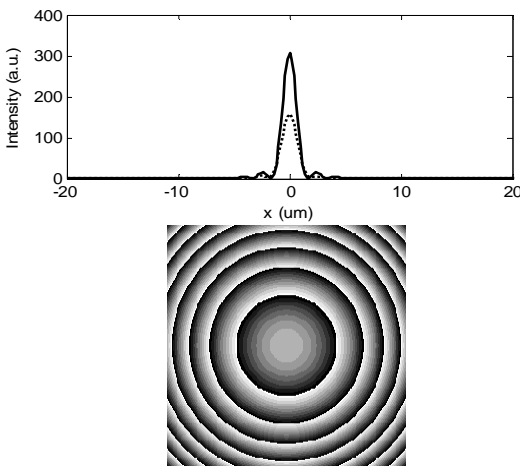
<sup>6</sup> Finite Difference Time Domain

<sup>7</sup> Perfect Matched Layer

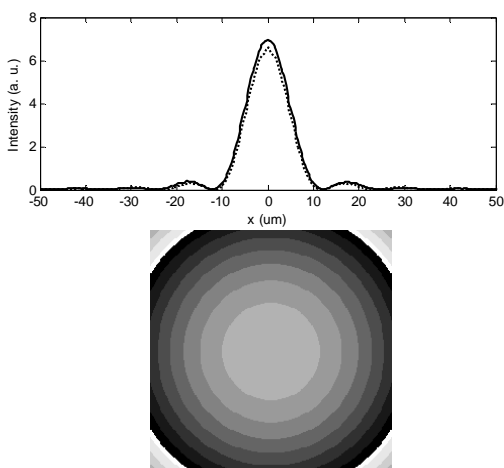
شکل ۱: برش طولی از ناحیه محاسباتی FDTD و ناحیه انتشار



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: مقاطع عرضی توزیع شدت در صفحه کانونی (شکل بالا) و ریز عدسی های طراحی شده (شکل پایین) با فواصل کانونی (الف)  $2\lambda$ ، (ب)  $10\lambda$  (ج)  $80\lambda$ . (منحنی های خط پر شدت به دست آمده

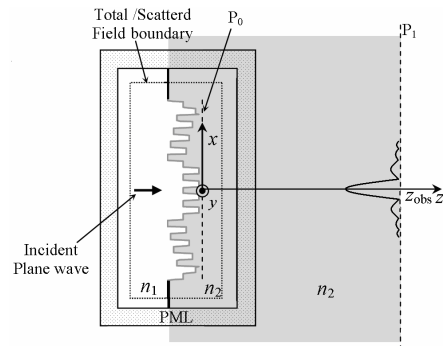
### ۳- ارزیابی ساختارهای طراحی شده

ناحیه محاسباتی FDTD شامل ریز عدسی است که در شکل ۱ برش طولی آن نشان داده شده است. در این شکل به منظور اعمال یک موج به ساختار، دو ناحیه میدان کل و میدان پراکندگی را تعریف کردیم. برای ایجاد شرط مرزی جاذب نیز از روش لایه منطبق کامل غیرتفکیک شده<sup>۸</sup> بهره برده ایم [۷]. اندازه مش در FDTD برای سه بعد مساوی و برابر  $\delta_x = \delta_y = \delta_z = \lambda/25$  انتخاب شده است. گام زمان نیز برابر  $\delta_t = \delta_x / (2c)$  انتخاب شده است که  $c$  سرعت نور در فضای آزاد می باشد. عمق ناحیه پراکندگی و لایه PML مساوی و هرکدام برابر  $7\delta_x$  انتخاب گردید. میدان تابشی یک موج مسطح یکنواخت با قطبش خطی در جهت  $x$  که در زمان به صورت پالس گوسی باریک  $E_{xinc} = \exp\{- (t-t_d)^2 / (2w_t^2)\}$  تغییر می کند، تعریف شده است که در این رابطه  $t_d = 4\delta_t$  و  $w_t = \delta_t$  به ترتیب زمان تاخیر و پهنای پالس هستند.

با بهره گیری از FDTD توزیع میدان های الکتریکی و مغناطیسی ( $\mathbf{E}$  و  $\mathbf{H}$ ) تا  $200\delta_t$  در صفحه خروجی  $P_0$  بدست آمده و سپس تبدیل فوریه میدان ها در این صفحه محاسبه می شود. در مرحله بعد با بهره گیری از روش طیف زاویه ای، برای هرکدام از مؤلفه های میدان به طور مجزا، توزیع میدان در صفحه کانونی  $P_1$  به دست می آید. توزیع شدت در صفحه کانونی با استفاده از رابطه

$$I(x, y) = \frac{1}{2} \text{Real}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\} \cdot \hat{a}_z \quad (3)$$

محاسبه می شود. شکل ۲ (الف)، (ب) و (ج) سه نمونه ریز عدسی طراحی شده و برشی از توزیع شدت آنها را در صفحه کانونی نشان می دهد.



<sup>8</sup> Unsplit step perfect matched layer

از POA و منحنی‌های خط چین شدت محاسبه شده از روش FDTD را نشان می‌دهند.

با روش تنها-فاز و منحنی‌های خط چین با روش FDTD محاسبه شده است.

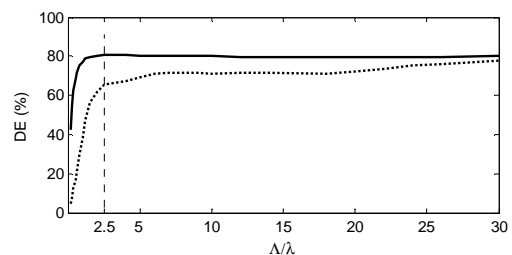
#### ۴- نتیجه‌گیری

با ارزیابی دقت روش تقریبی تنها-فاز به وسیله روش FDTD که مبتنی بر حل معادلات ماکسول است، اعتبار آن بررسی شد. در فواصل کانونی بیش از  $2.5\lambda$  یا به طور معادل در هنگامی که میانگین فاصله پرش‌های فاز متوالی، بزرگتر از  $2.5\lambda$  باشد، روش تنها-فاز با خطای کمتر از 20% در بازده پراش، معتبر است. دقت این روش با افزایش فاصله کانونی یا بزرگ شدن میانگین فاصله پرش-های متوالی بهتر می‌شود.

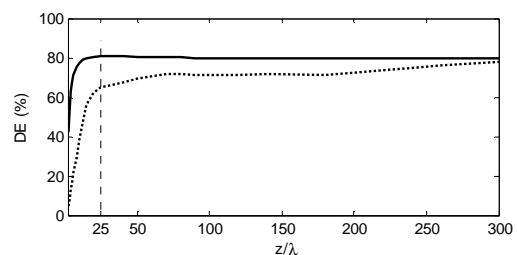
#### مراجع

- [1] T. G. Jabbour and S. M. Kuebler, *Vectorial beam shaping*, **Optics Express** 16, 7203 (2008).
- [2] J. Bengtsson, *Design of fan-out kinoforms in the entire scalar diffraction regime with an optimal-rotation-angle method*, **Appl. Opt.** 36, 8435 (1997).
- [3] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, *Practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures*, **Optik** 35, 237 (1972).
- [4] F. Wyrowski and O. Bryngdahl, *Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography*, **J. Opt. Soc. Am. A** 5, 1058 (1988).
- [5] S. D. Mellin, G. P. Nordin, *Limits of scalar diffraction theory and an iterative angular spectrum algorithm for finite aperture diffractive optical element design*, **Optics Express** 8, 706 (2001).
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Company, **Englewood**, (2005).
- [7] D. M. Sullivan, *An unsplit step 3-D PML for use with the FDTD method*, **IEEE Microwave and Guided Wave Letters** 7, 184 (1997).

این سه شکل نشان می‌دهند با افزایش فاصله کانونی،  $z$ ، میانگین فاصله پرش‌های متوالی،  $\Lambda$ ، افزایش یافته و منحنی شدت بدست آمده از روش تنها فاز به منحنی شدت واقعی که از روش FDTD به دست آمده نزدیک می‌شود. شکل ۳(الف) امکان مقایسه مقادیر بازده پراش را که از طراحی و ارزیابی سی عدد ریز عدسی به دست آمده است، فراهم می‌نماید. این شکل نشان می‌دهد هنگامی که  $\Lambda$  بیش از  $2.5\lambda$  است خطای نسبی بازده پراش کمتر از 20% است و با افزایش  $\Lambda$  خطا کاهش می‌یابد. شکل ۳(ب) نیز همین تغییرات را بر حسب فاصله کانونی نشان می‌دهد. شکل اخیر نشان می‌دهد که روش تنها-فاز برای طراحی ریز عدسی‌هایی با فاصله کانونی کمتر از  $2.5\lambda$  دقت کافی را ندارد. همچنین انتخاب طول موج  $\lambda=5\mu\text{m}$  و سیلیکن به عنوان ماده فقط برای محاسبات است و به کلیت نتیجه گیری لطمه نمی‌زند بنابراین منحنی‌های شکل ۳ مستقل از طول موج و ماده دی‌الکتریک هستند. تنها عاملی که روی این منحنی‌ها اثر دارد ابعاد ریز عدسی‌ها است. بزرگ یا کوچک انتخاب کردن ابعاد ریز عدسی‌ها تنها روی توان موجود در خارج از لوب اصلی اثر می‌گذارد و محدوده اعتبار روش را تغییر نمی‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۳(الف) تغییرات بازده پراش بر حسب میانگین فاصله پرش فاز (ب) تغییرات بازده پراش بر حسب فاصله کانونی، منحنی‌های خط پر