



طراحی یک عنصر نوری پراشی برای تخت کردن پرتوی گوسی لیزر CO₂ به وسیله الگوریتم طیف زاویه‌ای تکراری

سیدحسین کاظمی ریابی^{۱,۲}, میرمجتبی میرصالحی^۱ و امیررضا عطاری^۱

^۱ گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ مرکز پژوهشی مخابرات و کامپیوتر دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده - در این پژوهش با بهره گیری از الگوریتم طیف زاویه‌ای تکراری، یک عنصر نوری پراشی، که به هشت سطح کوانتیزه شده است، در یک دیسک ZnSe بگونه‌ای طراحی شده است که پرتوی گوسی لیزر CO₂ را به پرتویی با شدت یکنواخت تبدیل کند. برای پرتوی تخت شده، جذر میانگین مربعات خطأ و بازده پراش به ترتیب برابر ۱.۲۳٪ و ۸۶.۲۴٪ به دست آمدند.

کلید واژه - شکل دهنده پرتو، تخت کننده پرتو، طیف زاویه‌ای، عنصر نوری پراشی

کد ۰۵۰.۰۰۵۰ - PACS

۱- مقدمه

برای بررسی انتشار موج می‌توان به جای روش فوق از روش انتشار طیف زاویه‌ای ASP^۳ که بر مبنای انتشار امواج الکترومغناطیسی بدون در نظر گرفتن قطبش آن‌ها می‌باشد، برای محاسبه میدان‌های دور و نزدیک استفاده کرد^[۵]. از این روش انتشار در طراحی یک DOE که دو وظیفه شکل دهنده موج و عنصر انتخابگر مود را در حفره لیزری دارد، استفاده شده است^[۶].

میلن و نوردین^۴ با ترکیب دو روش تقریب عنصر نازک^۵ و روش ASP، الگوریتم طیف زاویه‌ای تکراری IASA^۶ را که شامل دو مرحله انتشار به جلو و انتشار به عقب است، بنا

پرتوی تولید شده توسط لیزر CO₂ می‌تواند توانی از چند میلی وات تا چند کیلو وات داشته باشد و محدوده وسیعی از کاربردهای صنعتی (مانند برشکاری و جوشکاری)، پیشکی و نظامی را دارا باشد^[۱]. برای استفاده در برخی از این کاربردها مانند نوشتمن مستقیم یا سوراخ کاری بوردهای مدار چاپی^[۲] توزیع شدت پرتو، که نزدیک به گوسی است، بایستی یکنواخت گردد. شکل دهنده‌ی پرتوی لیزر به روش‌های متنوعی قابل طراحی است. از جمله این شکل دهنده‌ها پخشگرهای پراشی یا عناصر نوری پراشی DOE^۱ هستند^[۳]. این عناصر به روش‌های مختلفی طراحی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به روش تقریبی گرشبرگ-ساکستون^۲ که بر مبنای استفاده از عدسی تبدیل فوریه

^۳Angular Spectrum Propagation

^۴Millen and Nordin

^۵Thin element method

^۶Iterative Angular Spectrum Algorithm

^۱Diffractive Optical Element

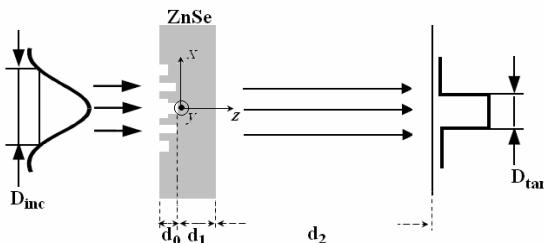
^۲Gerchberg-Saxton



به صورت

$$\phi(x, y) = k_0(n-1)d(x, y) \quad (2)$$

تعریف می شود که $d(x, y)$ تابع عمق خوردنگی است. توزیع میدان روی صفحه خروجی DOE از حاصل ضرب میدان تابشی $u_i(x, y)$ و تابع انتقال (1) به دست می آید و به صورت



شکل ۱: آرایش اپتیکی

$$u(x, y, 0) = u_i(x, y)t(x, y) \quad (3)$$

بیان می شود.

برای محاسبه توزیع میدان در صفحه مشاهده از روش انتشار طیف زاویه‌ای استفاده می شود [۵]. با فرض اینکه طیف فضایی مربوط به توزیع میدان $u(x, y, z)$ در موقعیت z صورت $U(f_x, f_y; z)$ و طیف فضایی مربوط به توزیع میدان $U_o(f_x, f_y)$ در صفحه خروجی DOE به صورت $u(x, y, 0)$ نمایش داده شود، $u(x, y, z)$ به صورت

$$u(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(f_x, f_y; z) \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (4)$$

بیان می شود، u می تواند بردار میدان الکتریکی E یا میدان مغناطیسی H باشد. به علاوه با توجه به تفسیر فیزیکی طیف زاویه‌ای [۵] داریم

$$u(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_o(f_x, f_y) \exp[j2\pi \frac{z}{\lambda_1} \sqrt{1 - \lambda_1^2(f_x^2 + f_y^2)}] \times \exp[j2\pi(f_x x + f_y y)] df_x df_y \quad (5)$$

که در اینجا λ_1 طول موج نور در داخل ZnSe است. با مقایسه این دو رابطه تابع تبدیل انتشار در این ناحیه به صورت

نهادند. آنها از این روش برای طراحی DOE دریچه محدود یا FADOE^۱ به عنوان پرتوشکاف استفاده کردند و اعتبار روش را با روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD^۲، ثابت کردند [۷-۸].

در این مقاله ما از روش میلن و نوردین در حالت دو بعدی برای طراحی تخت‌کننده پرتو استفاده کردیم. در بخش بعدی به بیان این روش خواهیم پرداخت. در بخش سوم با بیان جزئیات مسئله، نتایج به دست آمده از طراحی را ارائه داده‌ایم و بخش آخر را به نتیجه گیری و جمع‌بندی اختصاص داده‌ایم.

۲- الگوریتم طیف زاویه‌ای تکراری

محاسبات در IASA برای طراحی تخت‌کننده پرتو به سه ناحیه فضایی قابل تقسیم است. شکل ۱ این نواحی را نشان می دهد. ناحیه اول به ضخامت d_0 (بیشینه عمق DOE) به فضایی گفته می شود که شامل خوردنگی است. این ناحیه در راستای تابش به صفحات تابش و خروجی DOE محدود شده است. ناحیه دوم شامل فضایی $z=0$ است به ضخامت d_1 که بین صفحه خروجی DOE در $z=d_1$ قرار دارد. ناحیه سوم شامل فضایی به ضخامت d_2 است که بین صفحه خروجی DOE و صفحه مشاهده در $z=d_1+d_2$ قرار دارد.

فرایند انتشار نیز به دو مرحله انتشار به جلو و انتشار به عقب تقسیم می شود. در مرحله انتشار به جلو میدان تابشی با شدت گوسی با طول موج λ_0 و با بردار موج $\mathbf{k}_0 (=2\pi/\lambda_0)$ از فضای آزاد به DOE در امتداد محور اعمال می شود و پس از عبور از آن به صفحه خروجی DOE می رسد. در این ناحیه تابع انتقال به صورت

$$t(x, z) = \exp[j\phi(x, y)].\prod\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right) \quad (1)$$

بیان می شود که L_x و L_y به ترتیب طول و عرض DOE هستند و $\prod\left(\frac{x}{L_x}, \frac{y}{L_y}\right)$ در بازه $|x| < L_x/2$ و $|y| < L_y/2$ مقدار واحد و در سایر نقاط مقدار صفر را دارد. تابع فاز نیز

¹ Finite Aperture DOE² Finite Difference Time Domain



قرار است در یک دیسک ZnSe به ضخامت $d_0+d_1=1\text{mm}$ و شعاع 13mm با ضریب شکست $n=2.4$ (که به صورت تجاری در دسترس می‌باشد) که سطوح آن با لایه‌ای از ضد بازتاب پوشانده شده، طراحی شود. استفاده از ZnSe در طراحی به خاطر آستانه بالای توان و محدوده طیف عبوری مناسب آن می‌باشد.

صفحه مشاهده شامل یک دریچه دایره‌ای شکل به شعاع 13mm است که در فاصله d_2 از دیسک قرار گرفته است. مقدار d_2 معمولاً با توجه به نوع کاربرد لیزر در یک محدوده تعیین می‌شود که در اینجا بین 60 تا 80mm در نظر گرفته شده است.

برای تعیین مقدار مناسب d_2 یک جستجوی درشت با گام 0.1mm در محدوده 60 تا 80mm و سپس یک جستجوی IASA نرم با گام 0.01mm در محدوده 61 تا 63mm با انجام داده‌ایم تا محلی را که بهترین پاسخ را دارد بیابیم. در هر مرحله طراحی را از یک DOE با سطح یکنواخت 521×521 نقطه‌ای شروع و در هر نقطه IASA را ۵ بار تکرار کردۀایم (این تعداد تکرار برای همگرا شدن IASA کافی است). هر بار اجرای IASA، در محیط Matlab 7.2 و با سرعت CPU برابر با 2.7GHz ، 5.6 ثانیه، و زمان کل جستجو برابر 37.3 دقیقه اندازه‌گیری شد. در این جستجو مقدار جذر میانگین مربعات خطای RMSE^۱ که به صورت

$$RMSE = \sqrt{\frac{\iint_{all} (I_{cal} - I_{tar})^2 dx dy}{A}} \quad (10)$$

و بازده پراش DE^۲ که به صورت

$$DE = \frac{\iint_{in} I_{cal} dx dy}{\iint_{all} I_{cal} dx dy} \quad (11)$$

بیان شده‌اند، محاسبه گردید. I_{tar} شدت مطلوب و A مساحت دریچه هستند. انتگرال صورت در (۱۰) و مخرج در (۱۱) روی تمام صفحه مشاهده و انتگرال صورت در (۱۱) روی ناحیه داخل دایره‌ای به قطر $D_{tar}=10\text{mm}$ از صفحه

$$H_1(f_x, f_y) = \exp[j2\pi \frac{d_1}{\lambda_1} \sqrt{1-\lambda_1^2(f_x^2+f_y^2)}] \quad (6)$$

به دست می‌آید.تابع تبدیل انتشار در ناحیه سوم $H_2(f_x, f_y)$ با روش مشابه آنچه در مورد ناحیه دو بیان شد به دست می‌آید با این تفاوت که در (۵) و (۶) λ_1 را با λ_0 و d_1 را با d_2 تعویض کنیم. با توجه به شباهت رابطه (۵) به عکس تبدیل فوریه، توزیع میدان در صفحه مشاهده به صورت

$$u(x, y, d_1 + d_2) = FFT^{-1}[U_o(f_x, f_y) H_1(f_x, f_y) H_2(f_x, f_y)] \quad (7)$$

محاسبه می‌شود. شدت موج در صفحه مشاهده از رابطه

$$I_{cal} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}\{E \times H^*\} = \frac{1}{2} \frac{|E|^2}{\eta_0} \quad (8)$$

به دست می‌آید که η_0 امپدانس مشخصه فضای آزاد است. با مقایسه شدت محاسبه شده و شدت مطلوب، دامنه $(u(x, y, d_1 + d_2)$ (و نه فاز آن) بهبود داده می‌شود.

در مرحله انتشار به عقب میدان بهبود یافته با استفاده از عکس توابع انتقال به طرف DOE منتشر می‌شود و توزیع میدان در این صفحه با استفاده از عکس تبدیل فوریه به دست می‌آید. با بهره گیری از فاز موج برگشتی و عکس روابط (۱) و (۲) منحنی پیوسته عمق خوردگی محاسبه می‌شود. در اینجا با توجه به اینکه ساخت سطوح قوس دار دشوار است، دریچه به تعداد محدودی سطح کوانتیزه می‌شود. خطای ناشی از کوانتیزاسیون با تکرار مراحل انتشار به جلو و انتشار به عقب کمینه شده و ساختار DOE به شکل نهایی خود می‌رسد.

۳- طراحی تخت‌کننده پرتو

پرتوی تابشی گوسی، نور یک منبع لیزر CO₂ با طول موج $10.6\mu\text{m}$ و با توان 10W که قطر پوش آن در نقطه $1/\text{e}^2$ برابر ماکریم $D_{inc}=10\text{mm}$ است، در نظر گرفته شده است. شدت مطلوب یک سوبرگوسی به صورت

$$I_{tar} = \exp[-(x/w_0)^{20} - (y/w_0)^{20}] \quad (9)$$

فرض شده است که مقدار $w_0=4.5\text{mm}$ است.

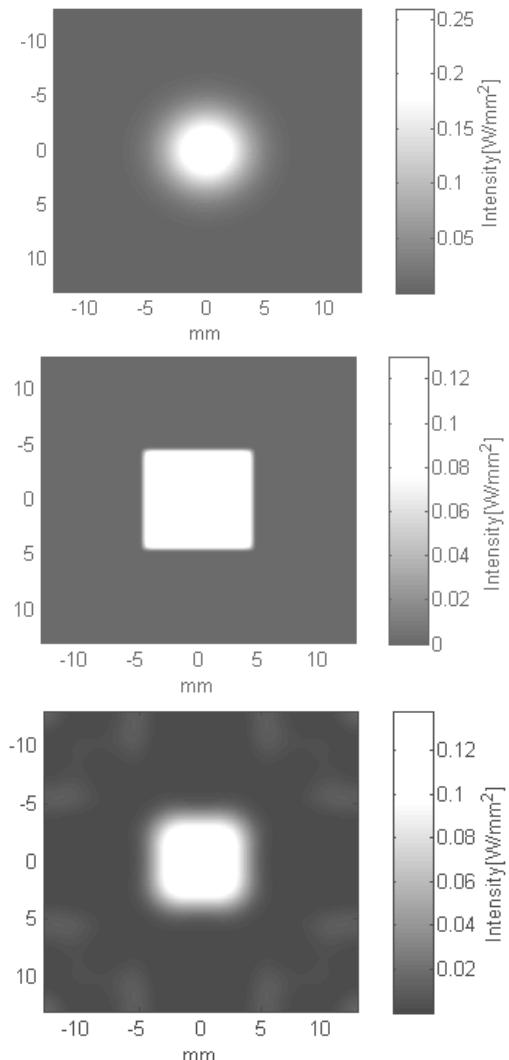
¹ Root Mean Square Error

² Diffraction Efficiency



۴- نتیجه‌گیری

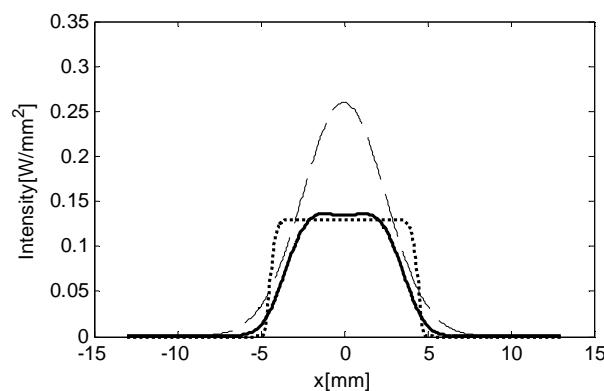
نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم طیف زاویه‌ای تکراری در حالت دو بعدی، هر چند حجم محاسبات آن بطور طبیعی افزایش می‌یابد، تمام مزایای حالت یک بعدی شامل سادگی، دقیق و سرعت را برای طراحی شکل دهنده‌های پرتو داراست.



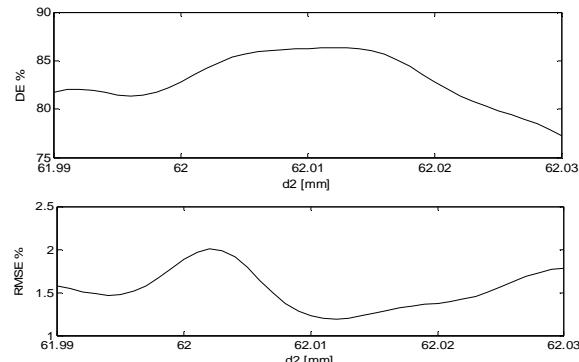
شکل ۴: شدت شبیه سازی شده پرتوی تابشی (تصویر بالا) در صفحه تابش، پرتوی مطلوب (تصویر وسط) و پرتوی تخت شده (تصویر پایین) در صفحه مشاهده.

مشاهده محاسبه شده است. برای این طراحی انجام شده برای بهترین نقطه $y=0$ از منحنی‌های $DE=86.24\%$, $d_2=62.01\text{mm}$, $RMSE=1.23\%$ به دست آمدند.

شکل ۲ برش مرکزی (در صفحه $y=0$) از منحنی‌های شدت تابشی، محاسبه شده و مطلوب را نشان می‌دهد. کاهش توان در منحنی شدت محاسبه شده نسبت به شدت مطلوب به دلیل حذف مولفه‌های میرای میدان در مرحله انتشار ناشی از توابع تبدیل انتشار H_1 و H_2 و همچنین حضور بخشی از توان در خارج دریچه می‌باشد.

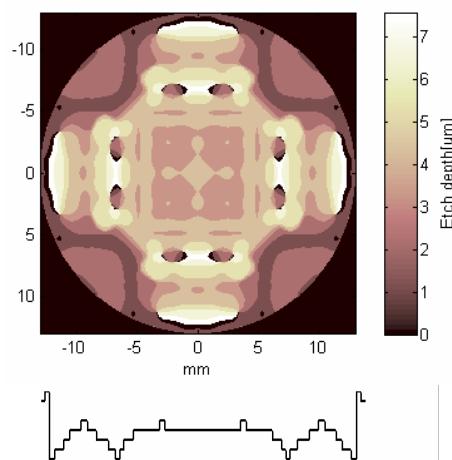


شکل ۲: برش مرکزی منحنی شدت در صفحه تابش برای پرتوی تابشی (خط‌چین درشت) و در صفحه مشاهده برای پرتوی تخت شده (خط ممتد) و پرتوی مطلوب (خط‌چین ریز).



شکل ۳: تغییرات DE (منحنی بالا) و RMSE (منحنی پایین) حول $d_2=62.01\text{mm}$

شکل ۳ تغییرات DE و RMSE حول $d_2=62.01\text{mm}$ را برای DOE طراحی شده نشان می‌دهد. این دو منحنی اثر تغییر محل صفحه مشاهده را، که در محدوده میدان نزدیک قرار دارد، بر DE و RMSE نشان می‌دهند. شکل ۴ تصویر شدت تابشی، مطلوب و محاسبه شده و شکل ۵ تصویر DOE طراحی شده را که در ۸ سطح کوانتیزه شده است، نشان می‌دهند.



شکل ۵: تصویر شبیه سازی شده DOE که در هشت سطح کوانتیزه شده است (تصویر بالا) و برش مرکزی آن (منحنی پایین)، گام سطوح برابر $1.08\mu\text{m}$ می باشد.

مراجع

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_dioxide_laser
- [2] E. Keiji, S. Manabu, O. Takeshi, F. Keiji and N. Hirokuni "Characteristics of ZnSe aspheric beam shaper for CO₂ laser," *Proc. SPIE* Vol. 4443, p. 125-134, 2001.
- [3] F. M. Dicky and S. C. Holswade, *Laser beam shaping theory and techniques*, Markel Dekker Inc., Newyork, 2000.
- [۴] م. ح. یوسفی، ح. ر. فلاج، م. برزوی و الف. پیازاده "طراحی و ساخت یک قطعه اپتیکی پراشی (DOE) برای تبدیل باریکه گوسی لزر به باریکه تخت،" *مجموعه مقالات ICOP2007* صفحات ۱۷۱-۱۷۵، ۱۳۸۵.
- [5] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [6] A. J. Caley, M. J. Thomson, J. Liu, A. J. Waddie and M. R. Taghizadeh "Diffractive optical elements for high gain lasers with arbitrary output beam profiles," *Optics Express*, vol. 15, no. 17, pp.10699-10704, 2007.
- [7] 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*, vol. 8, no. 13, pp.706-722, 2001.
- [8] S. D. Mellin, "Design and Analysis of Finite Aperture Diffractive Optical Elements," Ph.D. Dissertation, University of Alabama in Huntsville, Alabama, USA, 2001.