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

شبیه‌سازی باریکه خروجی از یک لیزر Nd:YAG دارای آینه گاوسی

نعیمه شریفی[۱]، محسن حاتمی[۲]،محمود برهانی[۱] و غلامرضا هنرآسا [۲]

[۱] گروه اتمی و ملکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد

[۲] گروه فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

چکیده – در این مقاله با استفاده از روش ماتریس *ABCD* و انتگرال پراش کالینز، باریکه خروجی از تشدیدگر یک لیزر *Nd:YAG* با آینه خروجی گاوسی را شبیه‌سازی می‌کنیم. به این منظور انتشار باریکه‌ها را درون تشدیدگر در رفت و برگشت‌های مختلف بررسی و با در نظر گرفتن تابع عبور مناسب برای آینه خروجی شکل عرضی باریکه خروجی را به‌دست می‌آوریم. نتایج نشان می‌دهد که پروفایل باریکه خروجی به پارامترهای تشدیدگر بستگی دارد و بعد از چند رفت و برگشت شکل ثابتی را به‌خود می‌گیرد.

کلید واژه- آینه گاوسی، پروفایل باریکه، لیزر Nd:YAG

Simulation of Output Beam Profile of a Nd:YAG Laser with Gaussian Mirror

Naeimeh Sharifi[1], Mohsen Hatami[2], Mahmoud Borhani[1] and Gholamreza Honarasa[2]

[1] Atomic and Molecular Group, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd

[2] Physics Group, Faculty of Science, Shiraz University of Technology, Shiraz

Abstract- In this paper, The output beam of a Nd:YAG laser resonator with a Gaussian mirror as an output coupler is simulated using ABCD matrix method and Collins diffraction integral. For this purpose, the beams propagation inside resonators for different round-trips is studied and by considering suitable transmission function for output coupler, the transverse profile of output beam is obtained. The results show that, the output beam profile depends on the resonator parameters and is stable after several round-trip.

Keywords: Beam profile, Gaussian mirror, Nd:YAG laser

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

۱- مقدمه

طراحی تشدیدگرهای اپتیکی در ساخت لیزرهای باریکهان نقش بسیار مهمی دارند [۱]. در این میان با شناخت دقیق از میدان لیزری درون تشدیدگر می‌توان به باریکه خروجی با کیفیت مطلوب دست یافت. از آنجا که شکل عرضی باریکه خروجی از لیزر در کاربردهای مختلف لیزر بسیار تاثیرگذار است، پیش‌بینی و شبیه‌سازی باریکه خروجی بر اساس عناصر موجود در تشدیدگر لیزری از اهمیت بالایی برخوردار است.

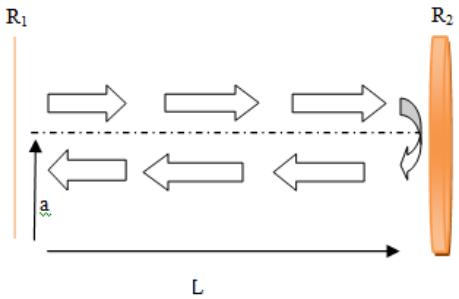
اخیرا استفاده از آینه‌های گاوسی به‌عنوان آینه‌هایی با بازتاب متغیر در تشدیدگرهای لیزری برای رسیدن به توان‌های بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۲]. باریکه‌های خروجی از آینه‌های گاوسی از جمله باریکه‌های اپتیکی با یک لکه تاریک در مرکز هستند که در تصویربرداری دقیق از نمونه‌های بیولوژیکی و انبرک‌های نوری کاربرد دارند [۳و۴]. تا کنون برای پروفایل خروجی از یک تشدیدگر تخت-تخت با آینه خروجی گاوسی و بدون محیط فعال یک جواب تحلیلی ارائه شده است [۵]. اما این جواب را نمی‌توان برای هرنوع تشدیدگری با آینه گاوسی و عناصر اپتیکی مختلف به‌کاربرد. در این مقاله با استفاده از روش ماتریس $ABCD$ و انتگرال پراش کالینز انتشار باریکه لیزر درون یک تشدیدگر دلخواه با آینه گاوسی را تحلیل کرده و باریکه خروجی از تشدیدگر را شبیه‌سازی می‌کنیم.

۲- پروفایل باریکه خروجی از تشدیدگر

با استفاده از انتگرال پراش کالینز انتشار میدان الکتریکی را در یک سامانه اپتیکی با ماتریس انتقال $ABCD$ می‌توان به‌دست‌آورد. انتگرال پراش کالینز به‌صورت زیر است[۶]:

$$E_2(x_2,y_2)=\frac{-i}{\lambda B}\exp[ikL] \times\iint_1 E_1(x_1,y_1)\exp[-i\frac{\pi}{\lambda B}(Ax_1^2+Dx_2^2-2x_1x_2+Ay_1^2+Dy_2^2-2y_1y_2)]dx_1dy_1 \quad (۱)$$

که در آن E_2 دامنه میدان موج الکترومغناطیسی بعد از عبور از سامانه اپتیکی، λ طول موج لیزر ، L طول انتشار و E_1 دامنه میدان اولیه و A, B, C, D عناصر ماتریس انتقال سامانه اپتیکی هستند. به‌این‌ترتیب در صورتی‌که میدان را در صفحه x_1 و y_1 و عناصر ماتریس انتقال را داشته‌باشیم، می‌توان میدان را در صفحه x_2 و y_2 به‌دست‌آورد. در این‌جا می‌خواهیم باریکه درون تشدیدگر را پس از یک رفت و برگشت کامل به‌دست‌آوریم. بنابراین برای یک رفت و برگشت کامل ماتریس $ABCD$ را به‌دست‌می‌آوریم. برای این‌کار ماتریس انتقال تمام عناصر اپتیکی که در یک رفت و برگشت کامل در مسیر باریکه قرار می‌گیرند را در هم ضرب می‌کنیم. صفحه اول را درست قبل‌از آینه خروجی و میدان اولیه را به‌صورت گاوسی در نظر می‌گیریم (شکل ۱).



شکل۱: تشدیدگر با دو آینه و بدون محیط فعال که R_1 آینه خروجی و R_2 آینه عقب می‌باشد.

با توجه به مد عرضی، به ازای تعداد مشخصی از رفت و برگشت، شکل باریکه درون تشدیدگر ثابت خواهد شد [۷]. برای به دست آوردن میدان درون تشدیدگر بعد از N رفت و برگشت می‌توان ماتریس یک رفت و برگشت کامل را به توان N رساند. در خاتمه برای به دست آوردن شکل باریکه خروجی باید توزیع میدان باریکه درون تشدیدگر (قبل از آینه خروجی) را در ضریب آینه خروجی ضرب کرد.

$$E_{out}=E_2\,t \quad (۲)$$

که در آن t ضریب عبور آینه خروجی است.

۳- آینه گاوسی

آینه گاوسی از نوع آینه های بازتاب کننده متغیر هستند. در آینه‌های گاوسی بازتابندگی به صورت توزیع گاوسی است یعنی بازتاب در وسط آینه بیشتر و در کناره‌ها کمتر است. برای بازتاب در آینه گاوسی داریم[۸]:

$$R(r)=R_0\exp[-2(\frac{r}{w_m})^2] \quad (۳)$$

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

فاصله در مرکز r ضریب بازتاب مرکزی، R_0 که در آن شعاع عرضی آینه‌ها است که در آن بازتاب w_m آینه‌ها و اندازه بیشینه خود می‌رسد. با توجه به رابطه (۳)، $\frac{1}{e^2}$ به ضریب عبور آینه خروجی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$t = T^{1/2} = [1 - R(r)]^{1/2} \qquad (۴)$$

همچنین ماتریس انتقال آینه گاوسی به صورت زیر معرفی شده است[۹]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} - i\frac{\lambda}{\pi w_m{}^2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} & 1 \end{bmatrix} + i\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{\lambda}{\pi w_m^2} & 0 \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

که در آن ρ شعاع انحنای آینه، λ طول موج نور است و این ماتریس شامل قسمت حقیقی و موهومی می‌باشد.

۴- شبیه‌سازی باریکه خروجی

در این بخش به شبیه‌سازی باریکه خروجی از دو تشدیدگر مختلف می‌پردازیم. ابتدا یک تشدیدگر تخت-تخت با آینه خروجی گاوسی (بدون محیط فعال) را در نظر می‌گیریم. سپس حالت عمومی‌تری با تشدیدگر تخت-مقعر (با محیط فعال) را بررسی می‌کنیم.

۴-۱- شبیه‌سازی برای تشدیدگر تخت-تخت

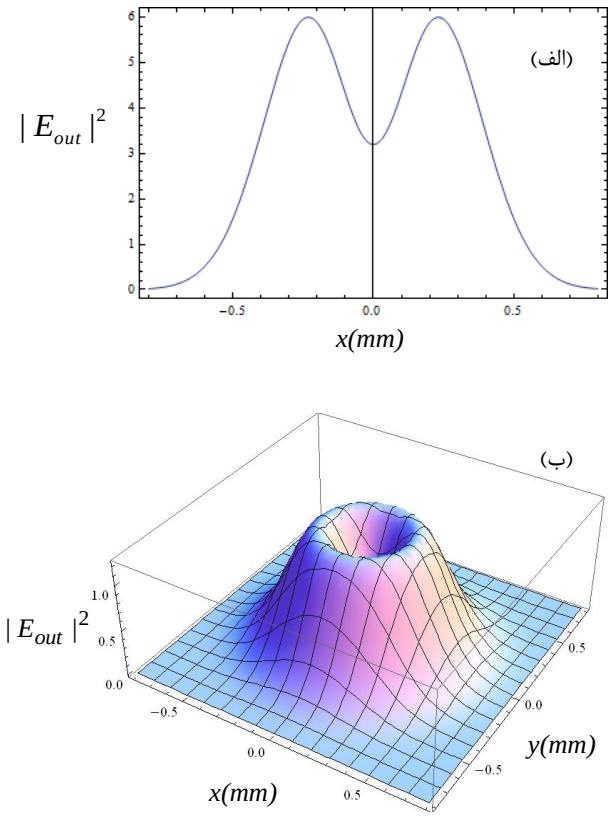
ماتریس انتقال برای یک رفت و برگشت کامل در یک تشدیدگر تخت-تخت بدون محیط فعال و با آینه خروجی گاوسی با توجه به شکل ۱ به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} - \frac{i\lambda}{\pi w_m^2} & 1 \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

که در آن L=۱۰۰mm فاصله بین آینه‌ها، R_1 و R_2 به ترتیب شعاع انحنای آینه خروجی و آینه عقب است که مقدار هر کدام بی‌نهایت است، λ طول موج لیزر Nd:YAG و w_m =۰/۴mm شعاع عرضی آینه گاوسی است. نتیجه شبیه‌سازی برای این حالت در شکل ۲ نمایش داده شده است. میدان خروجی از یک تشدیدگر تخت-تخت با آینه خروجی گاوسی به صورت تحلیلی قبلا به صورت زیر به دست آمده است[۵]:

$$E(x,y) = E_0 \exp[-\frac{x^2+y^2}{w_0^2} + ik\frac{x^2+y^2}{2R}] \times [1 - R_0 \exp(-2\beta^2 \frac{r^2}{w_0^2})]^{\frac{1}{2}} \qquad (۷)$$

که در آن E_0 دامنه باریکه گاوسی، R شعاع انحنای جبهه موج باریکه گاوسی ورودی، R_0 ضریب بازتاب در مرکز آینه گاوسی است. $\beta = \frac{w_0}{w_m}$ است که در آن w_0 اندازه لکه کمینه باریکه گاوسی است. چنانچه شدت میدان (۷) رسم شد شکلی کاملا مشابه شکل ۲ به دست می‌آید و این نشان می‌دهد شبیه‌سازی صورت گرفته با رابطه (۷) همخوانی کاملی دارد. این در حالی است که رابطه معرفی شده تنها برای یک تشدیدگر تخت-تخت و بدون ماده فعال قابل استفاده است، در حالی‌که روش ارائه شده در این مقاله برای هر نوع تشدیدگری و برای هر چیدمانی قابل استفاده است.



شکل۲: شدت میدان خروجی تشدیدگر تخت-تخت که بعداز ده بار رفت و برگشت (الف) شکل دو بعدی و (ب) شکل ۳بعدی میدان. در اینجا و در شکلهای بعد $|E_{out}|^2$ برحسب واحد اختیاری رسم شده است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]

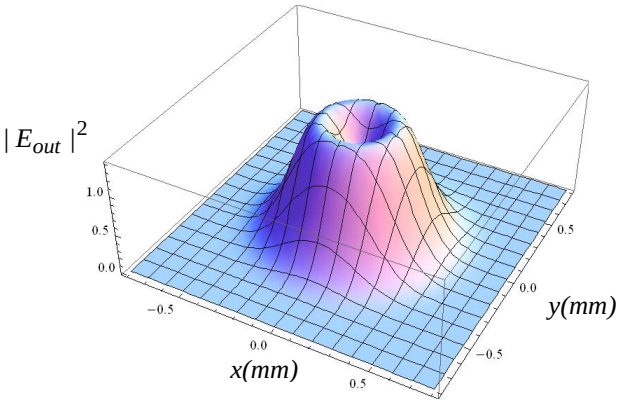
۴-۲- شبیه‌سازی برای تشدیدگر تخت-مقعر

یک تشدیدگر نمونه شامل آینه تخت (آینه خروجی)، آینه مقعر (آینه عقب) و محیط فعال لیزری می‌باشد که ماتریس انتقال برای یک رفت و برگشت کامل آن به صورت زیر است:

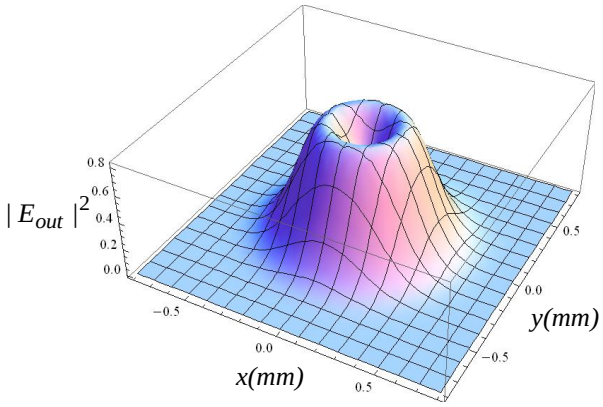
$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} - \frac{i\lambda}{\pi w_m^2} & 1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

که در آن $d_1=d_2=۲۰mm$ فواصل میله لیزر Nd:YAG از آینه‌های‌تشدیدگر، $d=۱۰۰mm$ طول و $n=۱/۸۲$ ضریب‌شکست میله Nd:YAG، $R_1=\infty$ شعاع انحنای آینه خروجی و $R_1=۱۰۰۰mm$ شعاع انحنای آینه عقبی تشدیدگر در نظر گرفته‌ایم. مقادیر عددی را با توجه به یک نمونه لیزر واقعی موجود در نظر گرفتیم.

با استفاده از عناصر ماتریس (۸)، ضریب عبور (۴) و حل انتگرال (۱) به صورت تحلیلی و با استفاده از نرم افزار Mathematica می‌توان شکل پروفایل خروجی از تشدیدگر لیزر را پس از طی رفت و برگشت‌های مختلف به‌دست آورد. نتایج شبیه‌سازی برای یک تشدیدگر لیزر Nd:YAG نوعی با آینه خروجی گاوسی در شکل ۳ و ۴ رسم شده است. همانطوری‌که شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد، شکل پروفایل خروجی از تشدیدگر تخت-مقعر پس از حدود ده رفت و برگشت کامل در تشدیدگر ثابت می‌شود.



شکل۳: شدت میدان خروجی از یک تشدیدگر تخت-مقعر لیزر Nd:YAG پس از پنج‌بار رفت و برگشت.



شکل۴: شدت میدان خروجی از یک تشدیدگر تخت-مقعر لیزر Nd:YAG پس‌از ده‌بار رفت و برگشت.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر توزیع دامنه مد عرضی را برای تشدیدگرهای تخت-تخت و تخت-مقعر یک لیزر Nd:YAG با آینه خروجی گاوسی، با استفاده از روش ماتریس *ABCD* و انتگرال کالینز با توجه به پارامترهای تشدیدگر بررسی کردیم. نتیجه شبیه‌سازی برای تشدیدگر تخت-تخت تطابق کاملی با رابطه تحلیلی موجود داشت و نشان داده شد که باریکه خروجی پس از چند رفت و برگشت شکل ثابتی را به‌خود می‌گیرد.

مراجع

[1] Magni V., Valentini G., De Silvestri S., *Recent developments in laser resonator design*, **Optical and Quantum Electronics** 23 (1991) 1105-1134.

[2] Li J., Chen Y., Qin Y., *Vectorial structural properties of truncated beam generated by Gaussian mirror resonator in the near field*, **Optics & Lasers Tech.** 44 (2012) 1574-1582.

[3] Klar T. A., Hell S., *Subdiffraction resolution in far-field fluorescence microscopy*, **Opt. Lett.** 24 (1999) 954.

[4] Zhang D. W., Yuan X.-C., *Optical doughnut for optical tweezers*, **Opt. Lett.** 28 (2003) 740.

[5] Li Y., *Propagation and focusing of Gaussian beams generated by Gaussian mirror resonators*, **J. Opt. Soc. Am. A** 19 (2002) 1832-1843.

[6] Collins S. A., *Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics*, **J. Opt. Soc. Am.** 60 (1970) 1168.

[۷] هاشمی، سمیه‌سادات، *امکان سنجی ساخت لیزر Nd:YAG دمش از پهلو توسط لیزر نیمرسانا*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۸۶.

[8] Hodgson N. and Weber H., *Laser resonators and beam propagation*, Springer, 2003.

[9] Yariv A. and Yeh P., *Confinement and stability in optical resonators employing mirrors with Gaussian reflectivity tapers*, **Opt. Commun.** 13 (1975) 370-374.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-31]