



## ایجاد تمایز مدی در مشدد لیزری با استفاده از توری فازی درون مشدد برای تولید مد اصلی ابرگوسی مرتبه ۲۰

ابوالحسن مبشری<sup>۱</sup>، احسان پناهی<sup>۲</sup> و سهراب منوچهری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم و فن آوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، [mobashery59@yahoo.com](mailto:mobashery59@yahoo.com)

<sup>۲</sup> و <sup>۳</sup> گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، [ehpdd@yahoo.com](mailto:ehpdd@yahoo.com) ، [dez283@yahoo.com](mailto:dez283@yahoo.com)

چکیده - ایجاد مدهای دلخواه در یک مشدد لیزری به عنوان مد پایدار و حذف مدهای ناخواسته دیگر امری رایج در طراحی مشددها جهت استفاده بهینه از محیط بهره به شمار می آید. با طراحی مشددی که شامل یک آینه انتخاب کننده مدی و یک توری فازی در داخل آن باشد، می توان تمایز مدی بالایی را در مشدد لیزر ایجاد نمود. آنچه در این تحقیق بدان پرداخته شده، شبیه سازی مشددی شامل یک آینه ی پراشی و توری فازی داخل آن، توسط نرم افزار *Mathlab* است. با استفاده از این روش، مدهای مرتبه ی بالاتر از مشدد اپتیکی حذف شده و مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ که توسط آینه انتخاب کننده مدی تولید شده است، با کمترین تلفات درون مشدد باقی می ماند. با مقایسه تلفات بین مد اصلی ابرگوسی مرتبه ۲۰ و مد  $TEM_{11}$  فرکانس بهینه برای توری فازی با شبیه سازی انتشار این دو مد در مشدد، بدست آمده است.

کلید واژه- توری فازی، آینه انتخاب کننده مدی، مد ابرگوسی مرتبه ۲۰.

## Modal Discrimination in a Laser Resonator by means of Internal Phase Grating to Produce 20<sup>th</sup> Order Super-Gaussian Mode as Fundamental Mode

A. Mobashery<sup>1</sup>, E. Panahi<sup>2</sup>, S. Manouchehri<sup>2</sup>

1- Optic and laser research center-Malek Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Isfahan

2- Department of Physics, Malek-Ashtar University of Technology, Shahinshahr, Isfahan.

Abstract- Producing desirable modes in a laser resonator as a fundamental one and eliminating other modes is common in designing laser resonators to extract more power from gain medium. High modal discrimination achieved by designing a resonator consists of a mode-selecting mirror and an internal phase grating. In this research, we simulate a resonator with a mode-selecting mirror and an internal phase grating by *Mathlab* software. By this method, higher order modes are eliminated and 20<sup>th</sup> order Super-Gaussian mode is produced by mode selecting mirror and remain with minimum loss. By comparing 20<sup>th</sup> Super-Gaussian and  $TEM_{11}$  modes, optimal frequency for phase grating is obtained by simulating these two mode propagation in resonator.

Keywords: Phase grating, Mode selecting mirror, 20<sup>th</sup> order Super-Gaussian mode.

## ۱- مقدمه

آینه پراشی برای تولید مد ابرگوسی شبیه‌سازی شده است. سپس توری فازی را به گونه‌ای به مشدد اضافه می‌کنیم که با وجود کاهش طول مشدد لیزری، تمایز مدی مطلوبی را ایجاد کند. سپس با شبیه‌سازی انتشار پرتو در داخل مشدد، اثر پارامترهای توری فازی بر تمایز مدی مشدد، بررسی خواهد شد.

## ۲- مبانی نظری

اولین مرحله، شامل طراحی آینه ابرگوسی برای تولید مد مورد نظر به عنوان خروجی مشدد لیزری است. برای این منظور پروفایل دامنه‌ی مد ابرگوسی را در خروجی در نظر می‌گیریم:

$$U_{out}(x, y) = \exp\left(-\left(\frac{x}{w}\right)^{20}\right) \exp\left(-\left(\frac{y}{w}\right)^{20}\right) \quad (1)$$

که در آن  $x$  و  $y$  پارامترهای مختصات طول و نیم‌پهنای پرتو هستند. انتشار پرتو درون مشدد از توابع انتشار فرنل بدست می‌آید که در مختصات دکارتی با رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود:

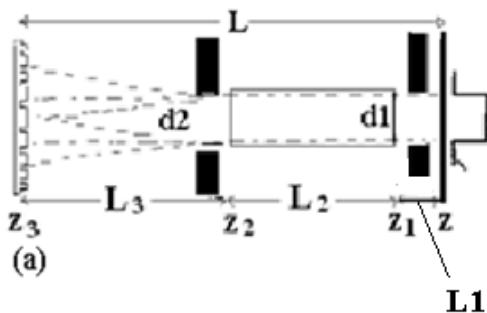
(۲)

$$u_{q+1}(x_2, y_2) = (je^{-jkz}) / \lambda z$$

$$\int_{-c}^c \int_{-a}^a u_q(x_1, y_1) e^{-jk[(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2]/2z} dx_1 dy_1$$

که  $z$  طول انتشار،  $\lambda$  طول موج،  $a$  و  $c$  ابعاد روزنه و  $k$  عدد موج است.

هندسه انتشار پرتو درون مشدد در شکل (۱) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، پرتو از نقطه  $z$  تا  $z_1$  مسافت  $L_1$  را طی می‌کند. سپس مسافت  $L_2$  بین نقاط  $z_1$  تا  $z_2$  را در محیط فعال پیموده تا به روزنه  $d_2$  برسد. پس از پراش پرتو از روزنه  $d_2$ ، پرتو مسیر  $L_3$  را در هوا طی کرده و به آینه پراشی در محل  $z_3$  می‌رسد. با استفاده از رابطه (۳) می‌توان الگوی سطح آینه را تعیین کرد:

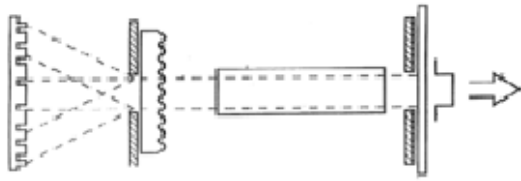


تعداد زیادی از لیزرهای تجاری از مشدد فابری پرو برای تولید مد مورد نظر استفاده می‌کنند. گرچه طراحی چنین مشدیدی، تلفات کمی را در مد اولیه ایجاد می‌کند ولی معایبی نیز دارد: اول آن که مدهای مرتبه بالاتر نیز در چنین مشدیدی تقویت می‌شوند و ایجاد تمایز میان آن‌ها توسط روزنه انتخاب‌گر مدی، سخت‌تر صورت می‌پذیرد. همچنین قطر پرتو در این مشدد بسیار کوچک بوده و میزان توان استخراجی از محیط بهره را کاهش می‌دهد. از طرفی، پروفایل گوسی ممکن است برای کاربردهای بسیاری که نیاز به شدت یکنواخت است، ایده‌آل نباشد، در بسیاری از کاربردهای صنعتی لیزر مانند جوشکاری و سوراخکاری لیزری، استفاده از پرتوهایی با شدت یکنواخت مورد نیاز است. به دلیل شباهت زیاد مدهای ابرگوسی مرتبه بالا به پرتوهای مربعی از آن‌ها در کاربردهای صنعتی می‌توان بهره جست. که تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است [۱].

مشددهای ناپایدار، مد اولیه با قطر بالا ایجاد کرده و مدهای مرتبه بالاتر را حذف می‌کنند، اما این لیزرها توان خروجی پایین داشته و برای لیزرهای با بهره پایین مناسب نیستند. مشددهای لیزری بسیاری ساخته شده‌اند که با بکارگیری اپتیک پیچیده، تمایز مدی بالایی را ایجاد می‌نمایند، از این جمله می‌توان به آینه‌های با بازتاب متغیر [۲]، آینه‌های با فاز پله‌ای [۳]، فیلترهای فضایی فوریه‌ای [۴] و روزنه‌ها اشاره نمود. این روش‌ها به طراح این امکان را می‌دهد تا پروفایل مدی را به شکل دلخواه درآورد و به عنوان نمونه، مد اولیه ابرگوسی با سطح پروفایل تخت، تولید نماید. تمایز بالا میان مدها در این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که طول مشدد تقریباً در حدود طول ریلی مد مورد نظر باشد تا پرتو ابرگوسی در مد اصلی مشدد ایجاد شود [۵]. بنابراین برای ایجاد پرتوهایی با قطر بزرگ باید مشددهایی با طول بسیار زیاد ساخته شود که از لحاظ پایدارسازی مکانیکی امکان پذیر نبوده و طول پالس را در سیستم‌های Q-switch شده افزایش می‌دهد [۶].

برای طراحی آینه‌های ابرگوسی به عنوان یکی از آینه‌های مشدد لیزری می‌توان از الگوریتم‌های تکرار شونده استفاده کرد [۷]. مشدد به دست آمده از این روش طول زیادی خواهد داشت. بنابراین در این مقاله، یک مشدد لیزری شامل

تمایز مدی مشدد را تغییر داد.



شکل ۲: مشدد فابری پرو شامل توری فازی

### ۳- شبیه سازی و نتایج آن

اولین بخش از شبیه سازی، استخراج الگوی فازی آینه پراشی برای تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ است. برای این منظور یک مد ابرگوسی با نیم پهنای و طول موج مشابه مثال بیان شده در قسمت قبل، در نظر می گیریم. اندازه روزنه های  $d_1$  و  $d_2$  را به ترتیب برابر ۱،۳ و ۴ میلیمتر انتخاب می نماییم تا پرتو مورد نظر بدون قطع شدن از آن ها عبور کند.

بر اساس رابطه ی برد رایلی، برای تولید مد ابرگوسی با نیم پهنای ۰،۶ میلیمتر و طول موج ۱،۰۶ میکرومتر به مشددی به طول ۱۰۶۶ میلیمتر نیاز است. در شکل (۱) این طول به سه بخش  $L_1$ ،  $L_2$  و  $L_3$  تقسیم شده است. فاصله  $L_2$  میله فعال لیزری را نشان می دهد که طول آن برابر با ۷۶ میلیمتر در نظر گرفته شده است. با چشم پوشی از فاصله کوچک  $L_1$ ، مقدار  $L_3$  برابر با ۹۹۰ میلیمتر به دست می آید. شبیه سازی انتشار پرتو در فواصل  $L_2$  و  $L_3$ ، با برنامه نویسی انتگرال پراش فرنل، که در رابطه ی (۲) نشان داده شده است، انجام می شود [۸]. این شبیه سازی ها که در نرم افزار متلب انجام شده است، شامل پراش از روزنه های  $d_1$  و  $d_2$  نیز است.

شکل (۳-الف) الگوی فازی آینه پراشی به دست آمده از شبیه سازی به روش انتشار پرتو در مشدد لیزری را نشان می دهد. انتشار پرتو از نقطه  $Z_3$  در شکل (۱) به سمت نقطه-ی  $Z_1$ ، درستی تولید مد ابرگوسی در این مشدد را نشان می دهد. این پرتو در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

شکل ۱: مشدد فابری پرو شامل آینه انتخاب کننده مدی (a) و مسیره های انتشار پرتو.

$$t(x, y) = \frac{A^*(x, y)}{A(x, y)} \quad (3)$$

که  $A(x, y)$  میدان در نقطه  $Z_3$  قبل از بازتاب و  $A^*(x, y)$  مزدوج مختلط این میدان بعد از بازتاب از آینه است. با ادامه انتشار پرتو از نقطه  $Z_3$  می توان درستی تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ که از مشدد خارج می شود را بررسی کرد. برای آن که تنها، مد مرتبه ۲۰ داخل مشدد تولید شود، طول مشدد باید از مرتبه  $Z_R = \frac{\pi \omega^2}{\lambda}$  باشد که  $\omega$  نیم پهنای لکه پرتو است. به عنوان مثال برای لیزری با طول موج - (۱،۰۶ میکرومتر)  $\lambda =$  و (۰،۶ میلیمتر)  $\omega =$ ، مشددی به طول ۱،۰۶۶ متر مورد نیاز است.

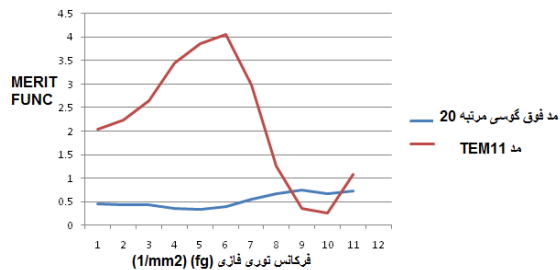
برای سادگی فرض می کنیم آینه ابرگوسی، یک آینه تخت است و روزنه های  $d_1$  و  $d_2$  به گونه ای انتخاب می شوند که مد ابرگوسی مرتبه ۲۰، به راحتی از آن ها عبور کند.

با کم شدن فاصله  $L_3$ ، به غیر از مد اصلی، مدهای مرتبه بالاتر نیز از روزنه  $d_2$  عبور می کنند که باعث کم شدن یکنواختی پرتو خروجی می شوند. با کم کردن قطر روزنه  $d_2$ ، حجم مد عبوری از محیط فعال لیزری کاهش می یابد. برای رفع این دو مشکل می توان از یک توری فازی در داخل مشدد استفاده کرد. وارد کردن این توری با فاز  $\varphi(x, y)$  سبب می شود تا پرتوها با عبور از توری دچار پراش شده و مرتبه های مختلف پراش از روی آینه به داخل مشدد بازتاب و دوباره با هم ترکیب شوند. با انتخاب مناسب تابع فاز می توان فاصله بین مرتبه های پراش را، به گونه ای تنظیم کرد که فقط مرتبه های پراش مربوط به مد اصلی، پس از بازتاب به صورت کامل با هم ترکیب شوند. در این حالت، مرتبه مرکزی پراش مدهای مرتبه بالاتر و دنباله سایر مرتبه های پراش با یکدیگر ترکیب می شوند که پس از چند رفت و برگشت پرتو در داخل مشدد، مدهای مرتبه بالا حذف می شوند. به عبارت دیگر، حضور توری فازی باعث افزایش تمایز مدی در مشدد خواهد شد. شکل (۲) محل قرارگیری توری در داخل مشدد را نشان می دهد. توری فازی در نظر گرفته شده با رابطه (۴) توصیف می شود:

$$G(x, y) = \exp[jm \sin(2\pi f_g x + 2\pi f_g y)] \quad (4)$$

که در این رابطه  $m$  ضریب مدولاسیون و  $f_g$  فرکانس فضایی توری را بیان می کند. با تغییر دادن این پارامترها می توان اثر

خروجی از مشدد با مد انتظاری را نشان می‌دهد. بنابراین با انتخاب این توری، مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ از مشدد خارج خواهد شد و سایر مدها مثل  $TEM_{11}$  حذف می‌شوند. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که تأثیر پارامتر  $m$  بر خروجی مشدد، ناچیز است.



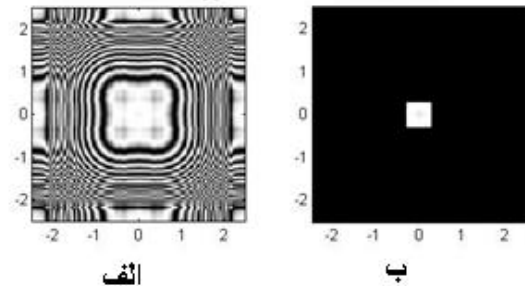
شکل ۴: تغییرات تابع شایستگی با فرکانس توری فازی برای دو مد ابرگوسی و  $TEM_{11}$ .

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق یک آینه پراشی برای تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ در مشدد لیزری شبیه‌سازی شده است. برای تولید مد اصلی در مشددی با طول کوتاه‌تر، یک توری پراشی، با تابع فاز سینوسی به مشدد اضافه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب فرکانس توری، تمایز مدی مشدد لیزری افزایش می‌یابد به گونه‌ای که مد اصلی با تلفات کم در مشدد تقویت و مدهای مرتبه بالاتر حذف می‌شوند. فرکانس مناسب برای شرایط مورد نظر این تحقیق، ۵ (۱/میلیمتر) است.

#### مراجع

- [1] J.R. Leger, "Phase Grating and Mode Selecting Mirror for a Laser", U.S.PATENT, No.5454004, 1995.
- [2] S. De Silvestri, V. Magni, O. Svelto, G. Valentini, IEEE J. Quantum Electron, Vol. 26, pp. 1500, 1990.
- [3] M. Piohe, D. Cantin, Opt. Lett, Vol. 16, pp. 1135, 1991.
- [4] V. Kermene, A. Saviot, M. Vampouille, B. Colombeau, C. Froehly, T. Dohnalik, Opt. Lett., Vol. 17, pp. 859, 1992.
- [5] J.R. Leger, D. Chen, G. Mowry, "Design and Performance of Diffractive Optics for Custom Laser Resonator", Appl. Opt., Vol. 34, pp. 2498-2509, 1995.
- [6] J.R. Leger, D. Chen, K. Dai, "High modal discrimination in Nd:YAG laser resonator with internal phase gratings", Appl. Opt., Vol. 19, pp. 1976-1978, 1994.
- [7] منوچهری، سهراب؛ پناهی، احسان؛ مهران، مهرداد؛ «شبیه‌سازی المان اپتیک پراشی برای مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ مربعی پرتو خروجی لیزر Nd:YAG»؛ سومین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ۱۳۹۲.
- [8] D.J. Voelz, *Computational Fourier optics a MATLAB tutorial*, SPIE. Press, Vol. TT89, Bellingham, Washington USA, 1959.



شکل ۳: الف) الگوی فازی پیاده سازی شده بر روی آینه پراشی. ب) توزیع شدت بدست آمده پس از یک رفت و برگشت درون مشدد.

در مرحله دوم، فاصله  $L_3$  را به ۲۰۰ میلیمتر کاهش می‌دهیم. با این کار علاوه بر مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ به عنوان مد اصلی، مدهای مرتبه بالاتر نیز از مشدد خارج می‌شوند. انتظار می‌رود که با اضافه کردن توری فاز به مشدد بتوان با وجود کاهش طول مشدد، سایر مدها مثل  $TEM_{01}$ ،  $TEM_{10}$ ،  $TEM_{11}$  و... را حذف کرد. برای حذف مدهای مرتبه بالاتر، توری فازی مطابق رابطه (۴) با در نظر گرفتن  $m=1$  و  $fg$  مناسب را به مشدد اضافه می‌کنیم. مشابه قبل، انتشار پرتو در مشدد شکل (۲) را شبیه سازی می‌کنیم. در این مرحله، پراش از توری فازی که بلافاصله قبل از روزنه قرار گرفته است نیز در شبیه سازی در نظر گرفته می‌شود.

برای تعیین مقدار تمایز مدی مشدد از رابطه (۵) به عنوان تابع شایستگی استفاده می‌نماییم:

$$Merit - Func = \frac{\sqrt{(U_{exp} - U_{out})^2}}{\sqrt{(U_{exp})^2}} \quad (5)$$

که  $U_{exp}$  میدان مورد انتظار در خروجی مشدد و  $U_{out}$  میدان بدست آمده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مد  $TEM_{11}$  به عنوان نماینده سایر مدهای اضافی در نظر گرفته شده است. یکی از پارامترهای توری فاز که با استفاده از آن می‌توان فرآیند تمایز مدی را نشان داد، فرکانس فضایی توری است. شکل (۴) تغییرات تابع شایستگی برحسب فرکانس فضایی توری فاز را نشان می‌دهد. براساس این شکل، تابع شایستگی مد ابرگوسی با تغییر فرکانس فضایی توری تغییرات چندانی ندارد درحالی‌که مقدار تابع شایستگی  $TEM_{11}$  افزایش می‌یابد و در فرکانس ۵ (۱/میلیمتر) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. تابع شایستگی تعریف شده در رابطه (۵) به صورتی که حداقل شدن آن شباهت زیاد مد