بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

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

ابوالحسن مبشری[۱]، احسان پناهی[۲] و سهراب منوچهری[۳]

[۱] پژوهشکده علوم و فن‌آوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، mobashery59@yahoo.com

[۲ و ۳] گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین شهر، اصفهان، ehpdd@yahoo.com ، 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 به‌شمار می‌آید. با طراحی مشددی که شامل یک آینه انتخاب‌کننده مدی و یک توری فازی در داخل آن باشد، می‌توان تمایز مدی بالایی را در مشدد لیزر ایجاد نمود. آن‌چه در این تحقیق بدان پرداخته شده، شبیه‌سازی مشددی شامل یک آینه‌ی پراشی و توری فازی داخل آن، توسط نرم‌افزار *Mathlab* است. با استفاده از این روش، مدهای مرتبه‌ی بالاتر از مشدد اپتیکی حذف شده و مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ که توسط آینه انتخاب‌کننده مدی تولید شده است، با کمترین تلفات درون مشدد باقی می‌ماند. با مقایسه تلفات بین مد اصلی ابرگوسی مرتبه ۲۰ و مد TEM_{11} فرکانس بهینه برای توری فازی با شبیه‌سازی 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 20th Order Super-Gaussian Mode as Fundamental Mode

A. Mobashery[1], E. Panahi[2], S. Manouchehri[2]

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 20th order Super-Gaussian mode is produced by mode selecting mirror and remain with minimum loss. By comparing 20th 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, 20th order Super-Gaussian mode.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

۱- مقدمه

تعداد زیادی از لیزرهای تجاری از مشدد فابری پرو برای تولید مد مورد نظر استفاده می‌کنند. گرچه طراحی چنین مشددی، تلفات کمی را در مد اولیه ایجاد می‌کند ولی معایبی نیز دارد: اول آن‌که مدهای مرتبه بالاتر نیز در چنین مشددی 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. به‌دلیل 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 قرارگرفته 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 به‌عنوان 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 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:

$$\boldsymbol{U_{out}}(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \boldsymbol{exp}(-(\tfrac{x}{w})^{\mathbf{20}})\boldsymbol{exp}(-(\tfrac{y}{w})^{\mathbf{20}}) \qquad (۱)$$

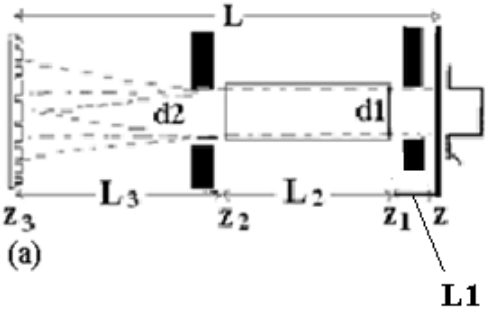
که درآن x و y پارامترهای مختصات طول و نیم‌پهنای پرتو هستند. انتشار پرتو درون مشدد از توابع انتشار فرنل بدست می‌آید که در مختصات دکارتی با رابطه‌ی (۲) بیان می‌شود:

(۲)

$$u_{q+1}(x_2,y_2) = (je^{-jkz})/\lambda z \int_{-c}^{c}\int_{-a}^{a} u_q(x_1,y_1) e^{-(jk[(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2])/2z} dx_1 dy_2$$

که z طول انتشار، λ 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:



این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

شکل ۱: مشدد فابری پرو شامل آینه انتخاب‌کننده مدی (a) و مسیرهای انتشار پرتو.

$$t(x,y) = \frac{A^*(x,y)}{A(x,y)} \quad (۳)$$

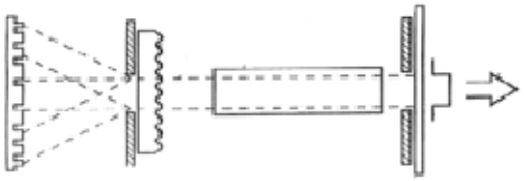
که $A(x,y)$ میدان در نقطه z_3 قبل از بازتاب و $A^*(x,y)$ مزدوج مختلط این میدان بعد از بازتاب از آینه است. با ادامه انتشار پرتو از نقطه z_3 می‌توان درستی تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ که از مشدد خارج می‌شود را بررسی کرد. برای آن‌که تنها، مد مرتبه ۲۰ داخل مشدد تولید شود، طول مشدد باید از مرتبه $z_R = \frac{\pi\omega^2}{\lambda}$ باشد که ω نیم‌پهنای لکه پرتو است. به عنوان مثال برای لیزری با طول‌موج λ=(۱,۰۶میکرومتر) و ω=(۰,۶میلیمتر)، مشددی به طول ۱,۰۶۶ متر مورد نیاز است.

برای سادگی فرض می‌کنیم آینه ابرگوسی، یک آینه تخت است و روزنه‌های d_1 و d_2 به‌گونه ای انتخاب می‌شوند که مد ابرگوسی مرتبه ۲۰، به راحتی از آن‌ها عبور کند.

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

$$G(x,y) = \exp[jm\sin(2\pi f_g x + 2\pi f_g y)] \quad (۴)$$

که در این رابطه m ضریب مدولاسیون و f_g فرکانس فضایی توری را بیان می‌کند. با تغییر دادن این پارامترها می‌توان اثر تمایز مدی مشدد را تغییر داد.



شکل۲: مشدد فابری پرو شامل توری فازی

۳- شبیه سازی و نتایج آن

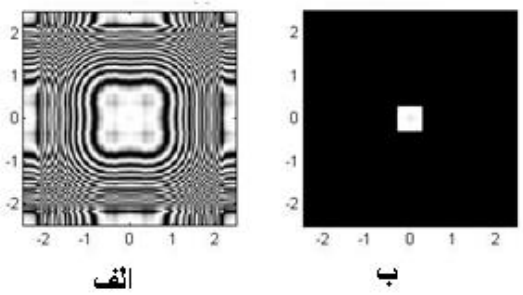
اولین بخش از شبیه‌سازی، استخراج الگوی فازی آینه پراشی برای تولید مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ است. برای این منظور یک مد ابرگوسی با نیم‌پهنا و طول‌موج مشابه مثال بیان‌شده در قسمت قبل، در نظر می‌گیریم. اندازه روزنه‌های d_1 و d_2 را به ترتیب برابر ۱,۳ و ۴ میلیمتر انتخاب می‌نماییم تا پرتو مورد نظر بدون قطع شدن از آن‌ها عبورکند.

براساس رابطه‌ی برد رایلی، برای تولید مد ابرگوسی با نیم پهنای ۰,۶میلیمتر و طول موج ۱,۰۶میکرومتر به مشددی به طول ۱۰۶۶میلیمتر 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 می‌دهد که طول آن برابر با ۷۶ میلیمتر درنظر گرفته شده است. با چشم‌پوشی از فاصله کوچک L_1، مقدار L_3 برابر با ۹۹۰میلیمتر به دست می‌آید. شبیه‌سازی انتشار پرتو در فواصل L_2 و L_3، با برنامه نویسی انتگرال پراش فرنل، که در رابطه‌ی (۲) نشان داده شده است، انجام می‌شود [۸]. این شبیه‌سازی‌ها که در نرم افزار متلب انجام شده است، شامل پراش از روزنه‌های d_1 و d_2 نیز است.

شکل (۳-الف) الگوی فازی آینه پراشی به دست آمده از شبیه‌سازی به روش انتشار پرتو در مشدد لیزری را نشان می‌دهد. انتشار پرتو از نقطه z_3 در شکل (۱) به سمت نقطه‌ی z_1، درستی تولید مد ابرگوسی در این مشدد را نشان می‌دهد. این پرتو در شکل (۳-ب) نشان داده شده است.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]



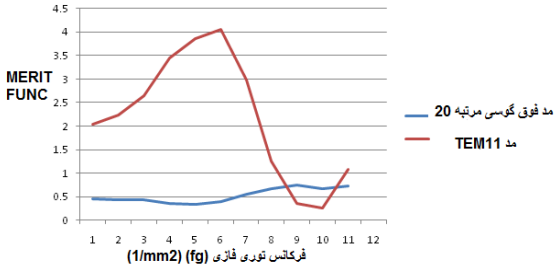
شکل۳: الف) الگوی فازی پیاده سازی شده بر روی آینه پراشی. ب) توزیع شدت بدست آمده پس از یک رفت و برگشت درون مشدد.

در مرحله دوم، فاصله L_3 را به ۲۰۰ میلیمتر کاهش می‌دهیم. با این‌کار علاوه بر مد ابرگوسی مرتبه ۲۰ به عنوان مد اصلی، مدهای مرتبه بالاتر نیز از مشدد خارج می‌شوند. انتظار می رود که با اضافه کردن توری فاز به مشدد بتوان با وجود کاهش طول مشدد، سایر مدها مثل TEM_{11}،TEM_{10}،TEM_{01} 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 d_2 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:

$$\boldsymbol{Merit-Func}=\frac{\sqrt{(U_{exp}-U_{out})^2}}{\sqrt{(U_{exp})^2}} \qquad (۵)$$

که $\boldsymbol{U_{exp}}$ میدان مورد انتظار در خروجی مشدد و $\boldsymbol{U_{out}}$ میدان بدست آمده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، مد TEM_{11} به عنوان نماینده سایر مدهای اضافی درنظر 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 شایستگیTEM_{11} افزایش می‌یابد و در فرکانس۵(۱/میلیمتر) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. تابع شایستگی تعریف شده در رابطه (۵) به صورتی که حداقل شدن آن شباهت زیاد مد 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 شبیه-سازی‌ها نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب فرکانس توری، تمایز مدی مشدد لیزری افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای 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.

[۷] منوچهری، سهراب؛ پناهی، احسان؛ مهرانی، مهرداد؛ «شبیه سازی 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 MATHLAB tutorial*, SPIE. Press, Vol. TT89, Bellingham, Washington USA, 1959.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]