بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

افزایش بازدهی با بهینه سازی مکان هسته تار در لیزرهای تاری دوغلافی

مسلم جوادی منش، سعید قوامی صبوری و علیرضا خورسندی

دانشکده فیزیک دانشگاه اصفهان

چکیده – در این پژوهش با بهینه سازی مکان هسته در لیزرهای تاری دو غلافی، جذب نور دمش در تارهای دایره‌ای و D-شکل مورد بررسی قرار گرفته و برای پارامترهای تجربی شبیه سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تار دایره‌ای با افزایش فاصله هسته از مرکز تار، بازدهی جذب پرتوهای دمش افزایش می‌یابد اما در تار D-شکل این تغییرات دارای یک نقطه‌ی بهینه می‌باشد. با بررسی این تغییرات در تار D-شکل، مکان بهینه جدیدی برای هسته بدست آمده است که در آن، جذب پرتوهای دمش در هسته‌ی تار از ۹۱٪ به ۹۷٪ افزایش می‌یابد.

کلید واژه- لیزر تاری دو غلافی، مکان هسته، روش پرتویابی

Optimization of the core location for efficiency enhancement of double-clad fiber lasers

Moslem Javadimanesh, Saeed Ghavami Sabouri and Alireza Khorsandi

Department of Physics, University of Isfahan, 81746-73441 Isfahan, Iran

Abstract- This paper aims at optimizing the absorption of the pump beam by core location in double-clad fiber lasers for circular and D-shaped fibers using practical data. The results indicate that, in a fiber with circular geometry, the absorption of the pump is increased by increasing the distance of the core from the center. However, in a D-shaped fiber, the variation of pump absorption has an optimum point. Considering these variations in the D-shaped fiber, a new optimum location for the core is obtained in which the pump absorption is increased from 91% to 97%.

Keywords: double clad fiber laser, core location, ray tracing method

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

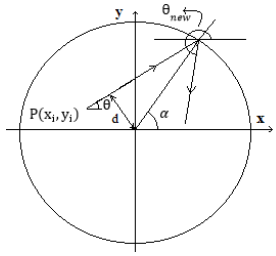
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱ مقدمه

تقویت توان در تارهای تک مدی آلاییده با عناصر خاکی کمیاب به دلیل دشواری در جفت کردن یک پرتو دمش با توان بالا به درون هسته با محدودیت روبروست. از اینرو طراحی تارهای دوغلافی با هدف غلبه بر این مشکل در سطح وسیعی انجام گرفته و می‌گیرد[۱]. تارهای با غلاف داخلی D-شکل به دلیل بازدهی جذب بالا، به صورت گسترده‌ای در ساخت لیزرهای تاری با توان بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون معمولا شعاع خمش تار خیلی بزرگتر از شعاع غلاف داخلی تار است، می توان اثر خمش را روی انتشار پرتوهای دمش نادیده گرفت و با استفاده از روش پرتویابی دو بعدی، درصد جذب این پرتو-ها را در تار تجریه و تحلیل کرد. برای این کار ما فرض می‌کنیم که: الف) قطر غلاف داخلی خیلی بزرگتر از طول موج دمش است به طوری که استفاده ازاپتیک هندسی با تقریب بالایی مجاز است، ب) مرز بین غلاف اول و دوم یک سطح ایده‌آل است و هیچ ابیراهی ندارد و ج) توزیع ضریب شکست در تار یکنواخت است. با فرض‌های یاد شده انتشار پرتو درون تار را می توان از اپتیک هندسی دنبال کرد[۲]. ما در این پژوهش تغییر جذب پرتوهای دمش در تار نوری دوغلافی را نسبت به مکان هسته در تارهای با سطح مقطع دایره‌ای و D-شکل مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که در تار دایره‌ای با افزایش فاصله هسته از مرکز تار، بازدهی جذب پرتوهای دمش افزایش می‌یابد اما در تار D-شکل این تغییرات دارای یک نقطه‌ی بهینه می‌باشد.

۲ زمینه نظری

همانطوری که در شکل (۱) نشان داده شده است، دسته-ای از پرتوها که جهت انتشار یکسانی دارند در صفحه‌ی ورودی تار در نقطه‌ی $P(x_i, y_i)$ با زاویه‌ی θ وارد تار شده و سپس توسط غلاف داخلی بازتاب می‌شوند.



شکل ۱: بازتاب پرتو از سطح غلاف داخلی

زاویه‌ی پرتو را پس از هر بازتاب می‌توان از رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$\theta_{New} = \pi + 2\alpha - \theta \qquad (۱)$$

مسیر انتشار پرتو را می‌توان با استفاده از قانون بازتاب و از رابطه زیر بدست آورد:

$$y - y_i = tg(\theta)(x - x_i) \qquad (۲)$$

از این رو فاصله‌ی بین محور هسته‌ی تار و پرتو برابر است با :

$$d = \frac{tg(\theta)x_i - y_i}{\sqrt{1+tg^2(\theta)}} \qquad (۳)$$

در صورتی که هسته تار به اندازه ρ در راستای y جابجا شود، فاصله‌ی جدید میان محور هسته‌ی تار و پرتو برابر است با :

$$d = \frac{tg(\theta)x_i + \rho - y_i}{\sqrt{1+tg^2(\theta)}} \qquad (۴)$$

همچنین در تار با سطح مقطع D-شکل داریم:

$$d = \frac{tg(\theta)(x_i - s) - y_i}{\sqrt{1+tg^2(\theta)}} \qquad (۵)$$

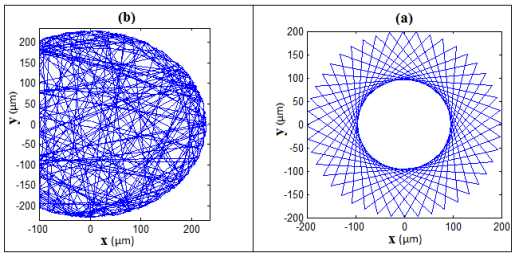
که در آن S برابر با فاصله‌ی هسته از مرکز تار است که در شکل (۵) مشخص شده است. اگر شعاع هسته‌ی تار برابر با r_0 باشد با توجه به معادله ۳ زمانی پرتو جذب هسته می‌شود که $d < r_0$ باشد. از طرفی d ثابت نیست و با تغییر نقطه‌ی P و جهت انتشار پرتو (θ_{New}) تغییر می-کند. همچنین نقطه‌ی P و θ_{New} با تغییر پرتوهای دمش و بازتاب آنها از سطح غلاف داخلی تار، تغییر می‌کنند. مسیر پرتوهای دمش بعد از هر بازتاب از سطح غلاف داخلی را با معادله‌ی ۲ می‌توان بدست آورد. بازدهی جذب پرتو های دمش با نسبت تعداد پرتوهای جذب شده در هسته به کل پرتوهای فرودی متناسب است. از این رو کمیت N را به عنوان تعداد بازتاب از سطح غلاف داخلی تعریف می‌کنیم. در این صورت برای پرتوی که هیچ بازتابی از سطح جانبی غلاف داخلی نداشته باشد و به هسته می رسد N=0 است. برای پرتوی که پس از یک بار بازتاب جذب هسته شود N=1 می باشد. پرتوهایی که در تار به صورت مارپیچ حرکت می‌کنند جذب هسته نمی-شوند. از آنجایی که N رابطه مستقیمی با طول تار دارد،

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

فرض می‌کنیم پرتوی که بیش از ۱۱۰ بار بازتاب جذب هسته نشود از تار خارج شده و یک پرتو مارپیچ است[۳].

۲-۱ بهینه سازی مکان هسته

شکل (۲) مسیر پرتوهای دمش در غلاف داخلی تار دو غلافی با سطح مقطع دایره‌ای و سطح مقطع D-شکل را نشان می دهد که آنرا در محیط MATLAB شبیه سازی کرده‌ایم.

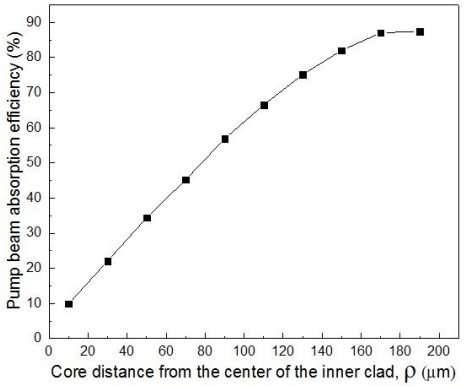


شکل ۲: مسیر پرتوها در غلاف داخلی تار با (a) سطح مقطع دایره‌ای و (b) D-شکل که درمحیط MATLAB شبیه سازی شده است.

دیده می‌شود در تار دوغلافی با سطح مقطع D-شکل تقارن دایره‌ای از بین رفته است که این باعث می‌شود تا جذب پرتوهای دمش در هسته تار افزایش یابد. اما برای افزایش جذب پرتوهای دمش در تار با سطح مقطع دایره-ای، لازم است مکان هسته را در صفحه XY تغییر دهیم.

۲-۱-۱ بررسی مکان هسته در تار دوغلافی با ساختار دایره‌ای

نمودار شکل (۳) تغییرات بازدهی جذب را نسبت به فاصله‌ی هسته از مرکز تار دوغلافی نشان می‌دهد.

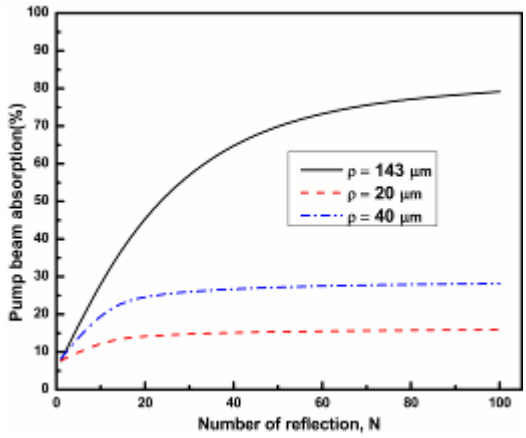


شکل ۳: تغییرات جذب پرتو دمش نسبت به ρ در تار دوغلافی با سطح مقطع دایره‌ای با شعاع غلاف داخلی R=200 μm و شعاع هسته $r_0 = 6\mu m$

همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است با افزایش ρ جذب پرتوهای دمش نیز افزایش می‌یابد به طوری که در $\rho = 190\mu m$ بازدهی جذب پرتوهای دمش به ۸۷,۴ می‌رسد. لازم به ذکر است که در عمل اندازه-ی ρ از معیار زیر پیروی می‌کند[۲] :

$$\rho + r_0 + 50 < R \qquad (۴)$$

که در آن R و r_0 به ترتیب شعاعهای غلاف داخلی و هسته تار دوغلافی می‌باشند. بنابراین با توجه به رابطه‌ی ۴، در تار نوری با شعاع غلاف داخلی $R = 200\mu m$ و شعاع هسته $r_0 = 6\mu m$ اندازه مجاز برای ρ کمتر از ۱۴۴ μm است. شکل (۴) تغییرات بازدهی جذب دمش بر حسب تعداد بازتاب از سطح غلاف داخلی را به ازای چند مقدار ρ نشان می‌دهد.

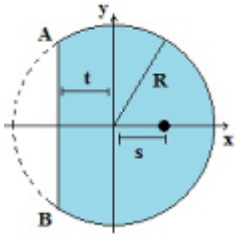


شکل۴: نمودار درصد جذب پرتوهای دمش بر حسب تعداد بازتاب در تار دایره‌ای با ρ های مختلف

همانطوری که پیداست بیشترین بازدهی جذب پرتوهای دمش از سطح مقطع خارج از مرکز برابر با ۷۹٪ به ازای $\rho =$ ۱۴۳ μm می‌باشد.

۲-۱-۲ بررسی مکان هسته در تار دوغلافی با ساختار D-شکل

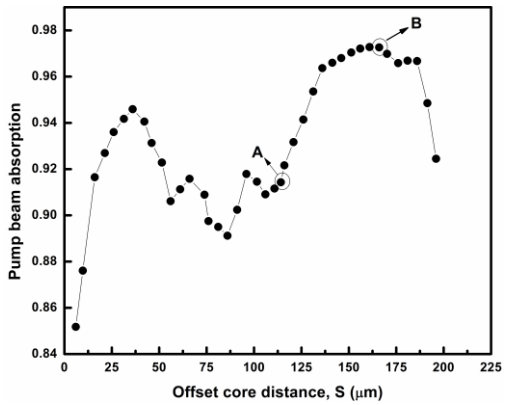
برای بررسی تغییرات جذب پرتوی دمش نسبت به مکان هسته در تاردو غلافی D-شکل جذب پرتوهای دمش شکل (۵) را در نظر می گیریم.



شکل۵: فاصله‌ی مرکز هسته از مبدا مختصات در تار دو غلافی D-شکل

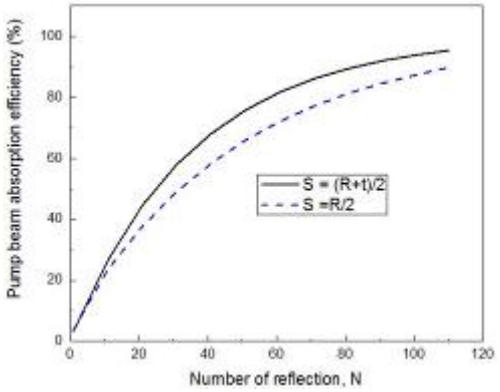
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]

در شکل t و R به ترتیب فاصله‌ی صفحه‌ی برش AB از مرکز هسته‌ی تار و شعاع غلاف اول می‌باشند. همچنین S برابر با فاصله‌ی هسته از مرکز تار است. در مرجع شماره[۴] مکان بهینه هسته در تار دو غلافی D-شکل، $s = R/2$ بدست آمده است. به این ترتیب برای بهینه سازی این فاصله، تغییرات جذب پرتوهای دمش نسبت به مکان هسته را با دقت مش‌بندی ۵ µm محاسبه کرده‌ایم که نتایج آن در شکل (٦) نشان داده شده است.



شکل۶: نمودار جذب پرتوهای دمش بر حسب S در تار دو غلافی D-شکل که سطح مقطع معادل دایره ای آن در R=۲۲۸ µm ، t=100µm و $r_0 = 6\mu m$ می باشد. در این محاسبه N=۱۱۰ فرض شده است.

تغییرات زیگ زاکی در شکل (۶) به این دلیل است که در تار نوری با سطح مقطع D-شکل، حرکت پرتوها کاملا بی نظم است. البته این بی نظمی به شکلی نیست که کنترل نشده و غیر قابل پیش بینی باشد بلکه این تغییرات از یک نمایه‌ی مشخص پیروی می‌کند. نقاط A و B به ترتیب مکان بهینه هسته بر اساس مرجع شماره [۴] و محاسبات انجام شده در این پژوهش است. دیده می شود که به ازای N=۱۱۰ بازدهی جذب پرتوهای دمش از ۹۱,۴٪ در $S = R/2$ به ۹۷,۱% در $S = (R+t)/2$ افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که در نقطه B جذب پرتوهای دمش تقریبا ۵,۷٪ افزایش یافته است و نسبت به تعداد بازتاب‌ها حساس است. بنابراین جذب پرتوهای دمش نسبت به تعداد بازتاب از سطح غلاف داخلی محاسبه و نتایج آن در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل۷: تغییرات جذب پرتوهای دمش نسبت به N. نمودار خط چین بر اساس مرجع شماره [۴] و نمودار توپر بر اساس محاسبات انجام شده در این پژوهش می باشد.

با توجه به نمودار شکل (۷) بازدهی جذب پرتوهای دمش در N=50 از ۶۵,۹٪ در $s = R/2$ به ۷۵,۷٪ در $(R+t)/2$ افزایش یافته‌اند.

۳ نتیجه‌گیری

ما در این پژوهش مکان هسته در تارهای دو غلافی با سطح مقطع دایره‌ای و D-شکل را با رهیافت اپتیک هندسی با استفاده از پرتویابی دوبعدی، مورد بررسی قرار دادیم. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که جذب پرتوهای دمش در سطح مقطع دایره‌ای با افزایش فاصله هسته از مرکز تار افزایش می‌یابد اما در تار D-شکل این تغییرات دارای یک نقطه‌ی بهینه می‌باشد. در ادامه با بررسی تغییرات جذب پرتوهای دمش در تار دو غلافی D-شکل، مکان بهینه جدیدی برای هسته معرفی کردیم که بر این اساس بازدهی جذب پرتوهای دمش در هسته‌ی این تار تا ۵,۷٪ افزایش یافته است.

مراجع

[1] Doya, V., O. Legrand, and F. Mortessagne, *Optimized absorption in a chaotic double-clad fiber amplifier*. **Optics letters,** 2001**. 26(12): p. 872-874.**

[2] Liu, A. and K. Ueda, *The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers*. **Optics Communications,** 1996**. 132(5): p. 511-518.**

[3] Loua, J.Z.Q., et al. *A new inner cladding shape for high-power double-clad fiber lasers*. **in Proceedings of SPIE.** 2002.

[4] Michel, C., et al., *Gain-controlled wave chaos in a chaotic optical fibre* .**Journal of the European Optical Society-Rapid publications**, 2009. **4**.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-13]