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

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری به روش "میدان نزدیک شکست یافته"

ناصر سیاهوشی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

پژوهشکده‌ی لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده –در این مقاله به بررسی تئوری و تجربی اندازه‌گیری و تعیین ضریب شکست فیبرهای نوری با استفاده از روش میدان نزدیک شکست یافته می‌پردازیم. با بررسی معادلات حاکم بر انتشار نور لیزر در فیبر و استخراج پارامترهای هندسی مرتبط با روش اندازه‌گیری، چیدمانی تجربی برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبر نوری طراحی و ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری بدست آمده توسط این چیدمان برای فیبر نوری $SMF\,28$، دقتی از مرتبه‌ی 10^{-4} را نشان داده است.

کلید واژه- پروفایل ضریب شکست، میدان نزدیک شکست یافته، پرتوهای نشتی، پرتوهای شکست یافته، فیبر نوری

Design and fabrication of the optical fibers refractive index profilometer by refractive near-field

Naser Siahvashi, Atoosa Sadat Arabanian and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Sahid Beheshti University

Abstract- in this paper refractive index measurements of the optical fibers is investigated theoretically and experimentally by the refractive near field approach. An experimental setup has been designed according to the consideration of light propagation in the optical fibers and calculation of the geometrical parameters for this measurement. The experimental results for SMF28 optical fiber have been shown that an accuracy in the order of 10^{-4} is achieved.

Keywords: refractive index profile, refractive near field, leaky ray, refracted ray, optical fiber

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

تغییرات ضریب شکست با شعاع (پروفایل ضریب شکست)، پارامتر بسیار مهمی برای فیبرهای نوری و موجبرهای اپتیکی می‌باشد. عمده‌ی خصوصیات و ویژگی های این المان‌های اپتیکی توسط پروفایل ضریب شکست آن‌ها قابل تعیین و اندازه‌گیری است. از جمله‌ی‌آن‌ها می‌توان به ابعاد و هندسه، قطر میدان مدی، شرایط تک مدی شدن، اندازه‌ی لکه، مشخصات پاشندگی، طول موج قطع و... اشاره نمود. لذا تعیین پروفایل ضریب شکست برای چنین ساختارهایی بسیار ضروری و مفید می‌باشد.

یکی از ساختارهای موجبری که امروزه بسیار مورد توجه واقع شده‌اند، موجبرهایی هستند که دارای سطح مقطعی در حدود $10\mu m^2$ بوده و تغییرات ضریب شکست آن‌ها از مرتبه‌ی 10^{-5} می‌باشد. همچنین دارای پروفایل ضریب شکستی مشابه فیبرهای نوری هستند. برای اطمینان از صحت عملکرد این ساختارها تعیین پروفایل ضریب شکست آن‌ها امری اجتناب ناپذیر بوده و لذا ساخت دستگاهی برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست این موجبرها لازم و ضروری می‌باشد. از طرفی به دلیل اینکه کلّیت روش مورد استفاده برای موجبرها می‌تواند برای فیبرهای نوری هم نتیجه بخش باشد، این مقاله به بررسی چگونگی به‌کارگیری روش فوق در فیبرهای نوری می‌پردازد. علت این رویکرد ورود به مساله سهولت کار با فیبرهای نوری، در دسترس بودن آن‌ها و نیز قیمت ارزان‌تر آن‌ها نسبت به موجبرها می‌باشد.

برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست، روش‌های متنوعی وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشند. برخی از این روش‌ها عبارتند از: تداخل‌سنجی، پراش، اندازه گیری بازتاب سطح مقطع فیبر، جاروب میدان نزدیک، میدان نزدیک عبوری و میدان نزدیک شکست یافته که بسته به کاربرد مورد نظر، مورد استفاده قرار می‌گیرند[1]. بارزترین مشخصه این روش‌ها، حساسیت به تغییرات ضریب شکست و قدرت تفکیک فضایی آن‌ها می‌باشد. بررسی‌هایی که تاکنون صورت گرفته حاکی از آن است که روش میدان نزدیک شکست یافته، تنها روشی است که می‌تواند تغییرات ضریب شکست از مرتبه 5×10^{-5} را اندازه‌گیری نماید[۲و۳].

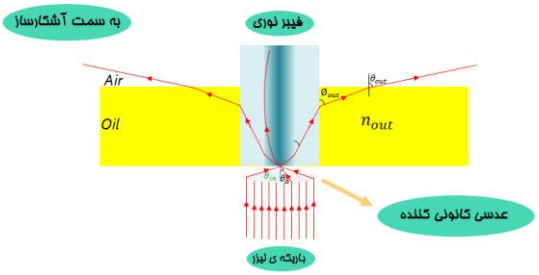
همچنین قدرت تفکیک فضایی این روش تا $400nm$ گزارش شده است که در مقایسه با بسیاری از روش‌های ارائه شده مقدار قابل ملاحظه‌ای است [۴]. از طرفی این روش توانایی اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست انواع فیبرهای نوری و ساختارهای موجبری را دارا می‌باشد. با توجه به مشخصات ارائه شده برای موجبرهای مذکور، روش میدان نزدیک شکست یافته، قابلیت لازم برای اندازه‌گیری این مشخصات را دارا می‌باشد. لذا این روش برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری مورد استفاده قرار گرفته است.

برای طراحی سیستم اندازه گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری و بدست آوردن پارامترهای بهینه در آن، معادلات حاکم بر فیبرهای نوری در این روش مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بررسی‌هایی که تاکنون صورت گرفته این معادلات با در نظر گرفتن فیبر نوری در محیط هوا با ضریب شکست $n=1$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما در این پژوهش با توجه به حضور فیبر نوری در محیط روغن، این معادلات با در نظر گرفتن این محیط از نو بازنویسی شده و معادلات لازم استخراج گردیده است. پس از طراحی سیستم و قطعات مورد نیاز، چیدمان آزمایشگاهی که برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست مورد نیاز است ساخته شده و برای اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبر نوری $SMF\,28$ با پروفایل مشخص آزمایش شده است. در ادامه بخش‌های فوق به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲- اصول و تئوری

اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری به این صورت انجام می‌گیرد که باریکه‌ی لیزر توسط عدسی شیئی با روزنه‌ی عددی بزرگتر از روزنه‌ی عددی فیبر نوری روی سطح مقطع فیبر که کاملاً تخت است کانونی می‌گردد. فیبر داخل مایعی با ضریب شکستی بزرگتر از ضریب شکست غلاف فیبر غوطه‌ور شده است. پرتوهای کانونی شده در سطح مقطع فیبر بسته به زاویه‌ی فرودشان در برخورد به فصل مشترک هسته و غلاف، بازتاب داخلی کلی یافته و در فیبر هدایت می‌شوند و یا شکست یافته وارد محیط غلاف فیبر می‌گردند(شکل۱).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]



شکل۲-۱: کانونی شدن باریکه‌ی لیزر در سطح مقطع فیبر نوری غوطه‌ور در روغن و شکست پرتوهای نور از غلاف فیبر

اساس روش میدان نزدیک شکست یافته آشکارسازی این پرتوهای شکست یافته می‌باشد. با جاروب سطح مقطع فیبر توسط جابجایی نقطه‌ی کانون و آشکارسازی پرتوهای شکست یافته در حین جاروب می‌توان پروفایل ضریب شکست فیبر را بدست آورد. برای رسیدن به این هدف نیاز است ابتدا ارتباط بین زوایای فرودی بر سطح مقطع فیبر و زوایای خروجی از مایع اطراف فیبر را با ضریب شکست سطح مقطع فیبر بدست آورده تا بتوان محدوده‌ی حضور پرتوهای شکست یافته را تعیین نمود.

مطابق شکل۱، با استفاده از قانون اسنل در سطح مقطع فیبر و نیز در فصول مشترک هسته و غلاف، غلاف و مایع و مایع و هوا و با ردیابی پرتو در محیط کاملاً اختیاری هسته که دارای ضریب شکستی تدریجی می‌باشد، ارتباط زاویه‌ی فرود بر سطح مقطع فیبر، θ_{in}، زاویه‌ی خروج نور از مایع اطراف فیبر، θ_{out} و ضریب شکست سطح مقطع فیبر، $n(r)$، به صورت زیر بدست می‌آید:

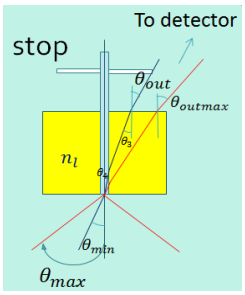
$$n(r)^2 = n_{in}^2 \sin^2\theta_{in} + n_{out}^2 - \sin^2\theta_{out} \qquad (1)$$

در رابطه‌ی (۱) n_{out} و n_{in} به ترتیب ضریب شکست مایع اطراف فیبر و ضریب شکست محیطی می‌باشد که سطح مقطع فیبر در آن قرار گرفته است.

همانطور که ذکر شد، با کانونی شدن باریکه‌ی لیزر در سطح مقطع فیبر نوری دسته‌ای از پرتوها در داخل فیبر هدایت شده و دسته‌ای دیگر شکست یافته و از هسته‌ی فیبر خارج می‌گردند. دسته‌ی دیگری از پرتوها نیز وجود دارند که تحت شرایط خاصی تولید شده و به داخل غلاف فیبر نفوذ کرده و از غلاف نیز خارج می‌گردند. این دسته از پرتوها که با عنوان پرتوهای نشتی شناخته شده‌اند، عامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست هستند و بایستی حذف گردند. لذا محدوده‌ی حضور آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان این محدوده را تعیین نمود.

$$\sin^2\theta_{out} = n_{out}^2 - n^2(a) + \alpha/2 N^2 n_{in}^2 \qquad (2)$$

در رابطه‌ی فوق $n(a)$ ضریب شکست غلاف فیبر، α پارامتر شکل پروفایل و N روزنه‌ی عددی فیبر می‌باشد. با تعیین بیشینه‌ی زاویه‌ی خروج این پرتوهای نشتی، θ_{out}، با استفاده از یک مانع می‌توان این پرتوها را حذف نمود. مطابق شکل۲ با حذف پرتوهای نشتی سایر پرتوها خروجی از مایع اطراف فیبر، پرتوهای شکست یافته بوده که برای تعیین ضریب شکست مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل۲: حذف پرتوهای نشتی و عبور پرتوهای شکست یافته از کنار مانع

همانطور که بیان شد باریکه‌ی لیزر توسط عدسی شیئی روی سطح مقطع فیبر کانونی می‌شود. در این حالت با توجه به توزیع شدت در سطح مقطع فیبر و با استفاده از رابطه‌ی (۱) ارتباط بین توان آشکارسازی شده توسط آشکارساز و ضریب شکست سطح مقطع فیبر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$p = \pi I_0 [1 + \sin^2\theta_{\max} - \frac{\sin^2\theta_{out}}{n_l^2} - \frac{n^2(r)}{n_l^2}] \qquad (3)$$

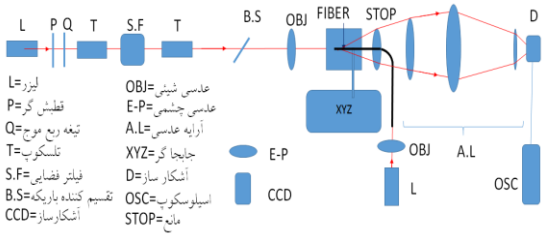
در رابطه‌ی فوق، p توان آشکارسازی شده، I_0 بیشینه‌ی شدتی که به آشکارساز می‌رسد، $\theta_{\max}$ بیشینه‌ی زاویه‌ی کانونی عدسی شیئی، θ_{out} بیشینه‌ی زاویه‌ی حضور پرتوهای نشتی می‌باشد. در بخش بعد به توصیف چیدمان تجربی پرداخته می‌شود که با به‌کارگیری

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

معادلات فوق و نیز سایر روابط طراحی گردیده است.

۳- چیدمان تجربی

شکل۳ چیدمان اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست را نشان می‌دهد.

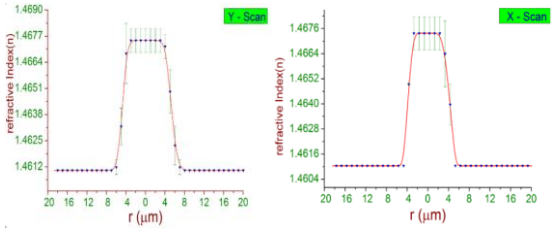


شکل ۳: چیدمان تجربی اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری به روش میدان نزدیک شکست یافته

باریکه‌ی لیزر دیود قرمز پس از عبور از قطبش‌گر و تیغه‌ی ربع موج وارد تلسکوپ پهن کننده می‌شود. پرتو خروجی تلسکوپ از سیستم فیلتر فضایی عبور کرده و سپس وارد تلسکوپی با بزرگنمایی معکوس می‌گردد. پرتو خروجی تلسکوپ پس از عبور از تقسیم کننده‌ی باریکه، توسط عدسی شیئی روی سطح مقطع فیبر کانونی می‌گردد. فیبر داخل محفظه‌ای حاوی روغن با ضریب شکست 1.517 قرار دارد. ابعاد محفظه با استفاده از معادلات حاکم و با در نظر گرفتن محدودیت های موجود در اندازه گیری به صورت بهینه طراحی شده است. با توجه به حضور پرتوهای نشتی، با استفاده از معادلات مربوطه مانعی برای حذف این پرتوها در نظر گرفته شده است که فیبر از مرکز این مانع عبور می‌کند. پس از قرارگیری سطح مقطع فیبر در محل کانون عدسی شیئی، از یک سیستم تصویر برداری برای مشاهده‌ی سطح مقطع فیبر استفاده می‌شود. پرتوهای خروجی از روغن به شدت واگرا هستند لذا برای جمع کردن این پرتوها بر روی سطح آشکار ساز، سیستم جمع کننده‌ای متشکل از چند عدسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شدت آشکارسازی شده به وسیله‌ی اسیلوسکوپ نمایش داده می‌شود.

۴- نتایج تجربی

برای بررسی صحت عملکرد دستگاه ساخته شده، فیبر نوری $SMF\,28$ با پروفایل ضریب شکست پله‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. ضریب شکست هسته و غلاف آن به ترتیب 1.4677 و 1.4610 و قطر هسته آن $8.2\pm0.4\mu m$ می‌باشد. همچنین جاروب سطح مقطع فیبر در دو جهت X و Y و با دقت $1\mu m$ انجام گرفته است. شکل۴ پروفایل ضریب شکست را در دو جهت X و Y نشان می‌دهد.



شکل۴: جاروب سطح مقطع فیبر در جهت x و y

در شکل۴ ضریب شکست به صورت تابعی از شعاع ترسیم شده است. مطابق این شکل اندازه‌ی ضریب شکست هسته‌ی فیبر برای جاروب در جهت X برابر 1.4673و در جهت Y برابر 1.4674بدست آمده است که با مقدار واقعی مطابقت بسیار خوبی دارد. همچنین $FWHM$ نمودار برای جاروب در جهت X برابر $8.1\pm1\mu m$ و در جهت Y برابر $9.9\pm1\mu m$ حاصل گردیده است که با دقت خوبی با مقدار واقعی مطابقت دارند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله دستگاه اندازه‌گیری پروفایل ضریب شکست فیبرهای نوری طراحی و ساخته شده است که توانایی اندازه‌گیری مقدار مطلق ضریب شکست با دقت 5×10^{-4} و قدرت تفکیک فضایی $1\mu m$را دارا می‌باشد.

مراجع

1.W.J.Stewart,*Optical Fiber and Preform Profiling Technology*, IEEE,vol 18.1451-1466,(1982)

2. M.JSaunders, *Optical fiber profiles using the refracted near-field technique: a comparison with othermethods.applied optics.* Vol 20. 1645-1651 .(1981)

3 K.thyagarajan, Ajoy ghatak . *introduction to fiber optics . (*1977)

4.Gattass,Rafael, *Femtosecond-laser interactions ,with transparent materials:applications in micro-machining and supercontinuum generation.(*2006)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]