بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
بهمن ۱۳۹۸ ۱۵-۱۶

ساخت حسگر ضریب شکست با ساختار ماخ زندری فیبر نوری چندمد-تک‌مد-چندمد (با رویکرد تحلیل توان خروجی)

زهرا اکبرپور[۱]، وحید احمدی*[۱]، فرزانه عربپور رق آبادی[۲]

[۱] گروه پژوهشی اپتوالکترونیک و نانوفوتونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

[۲] دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده – در این تحقیق، حسگر ضریب شکست مبتنی بر ساختار فیبری Multimode–Single-mode–Multimode (MSM) ساخته شده است. به علت وجود اختلاف در اندازه قطر هسته‌های دو نوع فیبر در محل اتصال آن‌ها، حسگر به ضریب شکست محیط اطراف خود حساس می‌شود. عملکرد حسگر در محلول آب-گلیسیرین با ضریب شکست‌های متفاوت بررسی شده است. بیشترین مقدار حساسیت حسگر مربوط به بازه ضریب شکستی ۱/۴۴ تا ۱/۴۷۵، در طول موج ۱۴۰۰ نانومتر بوده و برابر با RIU^{-1} ۱۸/۱۴۴- است. ساخت ساده و مقرون به صرفه بودن از جمله مزایای این حسگر به شمار می‌رود.

کلید واژه- حسگر ضریب شکست، ساختار MSM، ماخ زندر، فیبر تک‌مد، فیبر چندمد.

Fabrication of refractive index fiber optic sensor based on MSM Mach-Zehnder structure (With intensity analysis approach)

Zahra Akbarpour[1], Vahid Ahmadi[1,*], Farzaneh Arabpour Roghabadi[2]

1. Optoelectronic and Nanophotonic Research Group, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract- In this work, a refractive index (RI) sensor based on a Multimode–Single-mode–Multimode (MSM) fiber structure is fabricated. Due to the core mismatch of the two types of fibers, the sensor becomes sensitive to **the** RI of the outer media**.** The performance of the sensor is characterized inside water-glycerol solutions with different RIs. The maximum sensitivity of the sensor in the RI range of 1.44-1.475 is at the wavelength of 1400n**m** and equals to -18.144 RIU^{-1}. Facile fabrication and low cost are two of the main advantages of the fabricated sensor.

Keywords: Refractive index sensor, MSM, Mach-Zehnder, Single-mode fiber, Multimode fiber

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

مقدمه

ماده‌های شیمیایی مختلف و بسیاری از پارامترهای فیزیکی و بیولوژیکی را می‌توان از طریق اندازه‌گیری ضریب شکست شناسایی کرد. حسگرهای فیبر نوری ضریب شکست، به علت مزایایی که نسبت به دیگر حسگرهای ضریب شکست دارند، بسیار قابل توجه قرار گرفته‌اند. قابلیت تشخیص همزمان چند پارامتر، حساسیت بالا، مقاوم در برابر تداخل الکترومغناطیسی، قابلیت کنترل از راه دور، ابعاد کوچک و وزن کم، از جمله مزایای حسگرهای فیبر نوری هستند [۱و۲]. تکنولوژی حسگرهای فیبر نوری علاوه بر اندازه‌گیری ضریب شکست امکان حس کردن انواع پارامترها از جمله دما، کشش، کرنش، لرزش، فشار، میزان رطوبت و اندازه‌گیری‌های شیمیایی و زیستی را میسر نموده است. انواع ساختارهای فیبر نوری که به عنوان حسگر استفاده می‌شوند، عبارت‌اند از: فیبر توری براگ[۱]، فوتونیک کریستال[۲]، تداخل سنج فابری پرو[۳]، تداخل‌سنج ماخ زندر[۴] و غیره [۳و۴]. پژوهش‌های بسیاری در راستای حسگرهای فیبر نوری مبتنی بر تداخل‌سنج ماخ زندر انجام شده است که ساختار MSM نیز یکی از انواع ساختارهای ماخ زندری می‌باشد.

در سال ۲۰۱۲، An Sun و همکارانش حسگری با ساختار MSM برای اندازه‌گیری موج آکوستیک ارائه کرده‌اند. در این مقاله قسمت حساس ساختار که همان قسمت تک‌مد به طول ۳۰ میلی‌متر می‌باشد، بر روی یک ورقه آلومینیومی قرار گرفته است. با اعمال موج آکوستیک با فرکانس‌های متفاوت، صفحه آلومینیومی دچار لرزش و ساختار MSM نیز دچار ریزخمش خواهد شد. در نتیجه شدت نور خروجی نیز متناسب با فرکانس موج آکوستیک تغییر می‌کند[۵]. در سال ۲۰۱۹، Dame P. Marsela و همکارانش نیز حسگر فیبر نوری با ساختار MSM، برای تشخیص ناخالصی‌های روغن زیتون ارائه کرده‌اند. انجام این پژوهش به این صورت بوده که حسگر را در شش محفظه روغن زیتون با غلظت‌های ناخالصی ۱ تا ۶ درصد قرار داده‌اند. با افزایش درصد ناخالصی، توان عبوری از حسگر کاهش یافته است [۶].

در این کار، هدف بررسی تغییرات توان طیف خروجی از ساختار MSM با طول فیبر تک‌مد ۲۰ میلی‌متر، در حالتی که ساختار مذکور در محلول‌هایی با ضریب شکست‌های متفاوت قرار گیرد، است. در نهایت مشاهده خواهد شد که با افزایش ضریب شکست محیط اطراف حسگر، توان عبوری از آن کاهش می‌یابد.

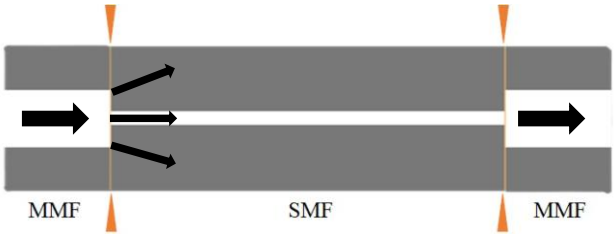
تجربی

در این پژوهش برای تشخیص تغییرات ضریب شکست یک سیال، حسگری مبتنی بر فیبر نوری با ساختار MSM ساخته و استفاده می‌شود. مکانیزم فیبر نوری بر اساس قانون بازتاب کلی داخلی[۵](TIR) است. برای این‌که نور درون فیبر قابلیت ارتباط با محیط اطراف را داشته باشد، باید عملیاتی بر روی فیبر انجام شود. ایجاد ساختار MSM نیز به منظور تحقق همین هدف است. برای ساخت حسگر مذکور از دو نوع فیبر تک‌مد و چندمد به ترتیب با قطر هسته‌ی ۸ و ۵۰ میکرومتر و قطر کلی ۱۲۵ میکرومتر استفاده شده است. قسمت تک‌مد به طول ۲۰ میلی‌متر توسط دستگاه Fusion splicer بین دو قطعه فیبر چندمد متصل شده است. فرایند ساخت ساده‌ی چنین حسگری که تنها شامل برش عمودی فیبرها و اتصال آن‌ها است، از جمله مزیت‌های این نوع حسگر به شمار می‌رود. شکل۱ نمایی از ساختار MSM را نشان می‌دهد.

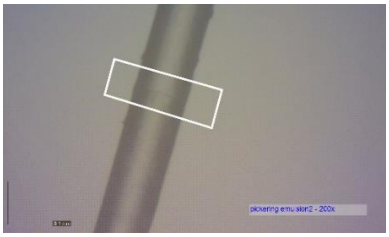
[۱] Fiber Bragg Grating
[۲] Photonic Crystal
[۳] Fabry Perot Interferometer
[۴] Mach Zehnder Interferometer
[۵] Total Internal Reflection

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

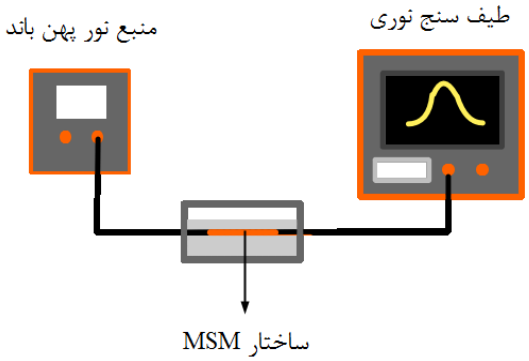


شکل ۱. نمایی از حسگر فیبری MSM ساخته شده



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی محل اتصال دو نوع فیبر

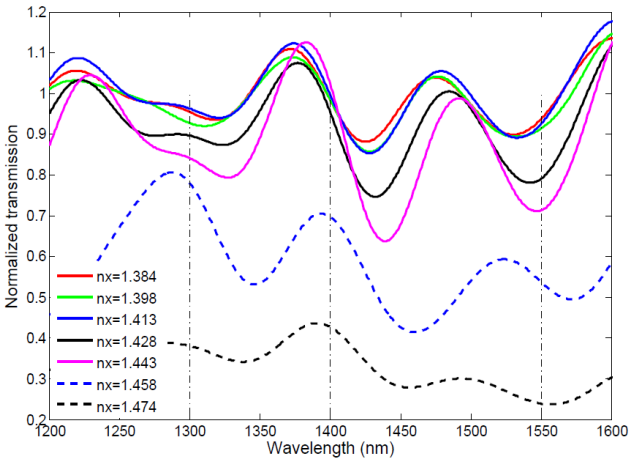
در شکل۲ تصویر میکروسکوپی محل اتصال فیبرهای تک‌مد و چندمد نشان داده شده است. شکل۳ تجهیزات مورد نیاز جهت تست و طیف‌گیری حسگر ساخته شده را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش، نور از یک منبع پهن‌باند[۱] وارد فیبر شده و طیف خروجی توسط دستگاه طیف‌سنج نوری[۲] اندازه‌گیری شده است.



شکل ۳. تجهیزات مورد نیاز طیف سنجی

نتایج

در حسگر ساخته شده (شکل ۱)، قسمت تک‌مد در اصل به عنوان ناحیه حساس عمل می‌کند. به علت اختلاف در اندازه‌ی قطر هسته‌های قسمت تک‌مد و چندمد در محل اتصال آن‌ها، میزانی نور به درون پوسته‌ی قسمت تک‌مد نیز وارد و هدایت می‌شود. در این حالت یک مد در هسته و چندین مد در پوسته‌ی تک‌مد ایجاد می‌گردد. در شکل ۴ طیف عبوری از حسگر به ازای ضریب شکست‌های متفاوت نسبت به طیف عبوری از حسگر در هوا، نرمالیزه و نمایش داده شده است. با افزایش ضریب شکست علاوه بر افت توان خروجی، مقداری جابه‌جایی در طیف عبوری نیز ایجاد می‌شود. دلیل این جابه‌جایی وابستگی ضریب شکست مؤثر مودهای پوسته به ضریب شکست خود پوسته و محیط اطراف حسگر می‌باشد. از این رو با تغییر ضریب شکست محیط، مودهای پوسته دچار تغییر شده و در نتیجه طیف خروجی از ساختار که ناشی از تداخل مودهای هسته و پوسته می‌باشد، به سمت طول موج‌های کم‌تر یا بیشتر می‌رود و می‌توان از آن به عنوان ابزاری برای تعیین و اندازه‌گیری آشفتگی‌های خارج از فیبر استفاده کرد.



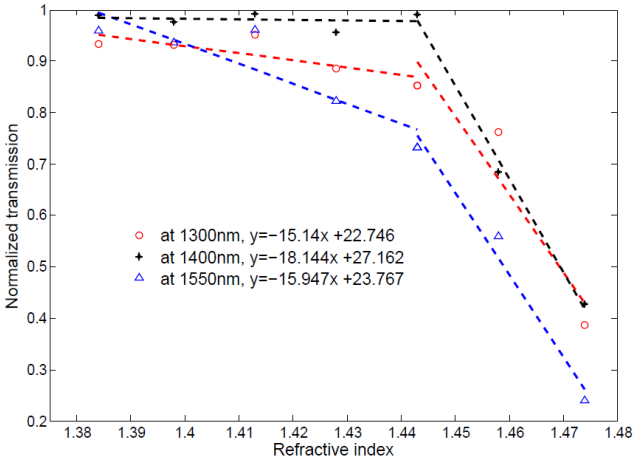
شکل ۴. طیف خروجی حسگر به ازای ضریب شکست‌های متفاوت

توان خروجی نرمالایز شده حسگر بر حسب ضریب شکست محلول آب-گلیسرین در طول موج های ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۵۰ نانومتر، در شکل۵ نمایش داده شده است.

[۱] Broad Band Source
[۲] Optical Spectrum Analyzer

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]



شکل ۵. توان خروجی نرمالایز شده به ازای تغییرات ضریب شکست در طول موج‌های ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۵۰ نانومتر

می‌توان دو ناحیه برای اندازه گیری مقدار دقیق حساسیت در نظر گرفت. در ناحیه دوم (بازه ضریب شکستی ۱/۴۴ تا ۱/۴۷۵) ضریب شکست نزدیک به ضریب شکست پوسته قسمت تک‌مد (۱/۴۶) می‌باشد به همین دلیل شیب افت توان بیشتر از شیب افت توان در ناحیه اول (بازه ضریب شکستی ۱/۳۸ تا ۱/۴۴) می‌باشد. با افزایش ضریب شکست محیط بیرون و نزدیک شدن آن به ضریب شکست پوسته قسمت تک‌مد، نور موجود در پوسته به تدریج به محیط بیرون نفوذ می‌کند و اگر مقدار این ضریب شکست برابر و یا بیشتر از ضریب شکست پوسته شود، تقریبا تمام نور داخل پوسته از آن خارج می‌شود. با این وجود شدت نور خروجی هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد، دلیل این اتفاق غیروابسته بودن نور عبوری از هسته‌ی فیبر تک‌مد به تغییرات محیط خارج از حسگر است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، توان خروجی نرمالایز شده به ازای افزایش ضریب شکست محیط اطراف حسگر، برای هر سه طول موج ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۵۰ نانومتر روند کاهشی دارد، اما حساسیت حسگر برای طول موج ۱۴۰۰ نانومتر در بازه‌ی ضریب شکستی ۱/۴۴ تا ۱/۴۷۵ بیشتر از حساسیت در طول موج های دیگر است و برابر با RIU^{-1} ۱۸/۱۴۴- می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر فیبر نوری با ساختار MSM ساخته شد. برای ساخت این حسگر یک قطعه فیبر تک‌مد بین دو فیبر چندمد قرار گرفت. اختلاف در اندازه قطر هسته‌های دو نوع فیبر باعث شد که علاوه بر مد هسته، مدهای پوسته قسمت تک‌مد نیز فعال شوند. توان خروجی نرمالایز شده به ازای افزایش ضریب شکست محیط اطراف حسگر، برای هر سه طول موج ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۵۰ نانومتر روندی مشابه و کاهشی نشان داد. بیشترین مقدار حساسیت حسگر مربوط به بازه ضریب شکستی ۱/۴۴ تا ۱/۴۷۵، در طول موج ۱۴۰۰ نانومتر بوده و برابر با RIU^{-1} ۱۸/۱۴۴- بدست آمد.

مرجع‌ها

[1] M.-j. Yin, B. Gu, Q.-F. An, C. Yang, Y. L. Guan, and K.-T. Yong, "Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications," *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 376, pp. 348-392, 2018.

[2] Bao, Yi, Ying Huang, Matthew S. Hoehler, and Genda Chen. "Review of fiber optic sensors for structural fire engineering.", *Sensors*, 19, no. 4, 877, 2019.

[3] Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun and Hamzah Arof, *Fiber Optic Sensors*, InTech, 2012.

[4] J.Y. Zhanga, E.J. Dinga, Z.H. Li, S.C. Xuc,d,e, X.X. Wang, X.Y. Lif, K.W. Ma,"An improved tin oxide core mismatch optical fiber sensor and its preparation method.", *Optical Fiber Technology*, Vol. 48, pp. 253-257, 2019.

[5] An Sun, Zhishen Wu, Chunfeng Wan, Caiqian Yang, "All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure", *Optik*, Vol. 123, p. 1138–1139, 2012.

[6] Dame P. Marsela, Ninik Irawati, Rinda N. Hidayati, Hafidz F. Rochman, Ika Puspita, Agus M. Hatta, and Sekartedjo, “Detection of adulterated olive oil using multimode-singlemode-multimode (MSM) fiber structure", AIP Conf. Proc. Advanced Industrial Technology in Engineering Physics, 2019.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

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