بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

مدل سازی حسگر ضریب شکست فیبرنوری دو هسته ی بر اساس تداخل سنج ماخ زندر

فائزه اکبری، میرحسین سید نظری، حمید لطیفی، محمد اسماعیل زیبائی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی- اوین، بلوار دانشجو، تهران

چکیده – در این مقاله فیبرنوری دوهسته برا ساس تداخل سنج ماخ زندر برای اندازه گیری تغییرات ضریب شکست شبیه سازی شده است. در این ساختار یکی از هسته ها با ژرمانیوم و هسته ی دیگر با فسفر دوپ شده است. از آن جایی که طول دو بازو در این حالت یکسان است طرح تداخلی در اثر اختلاف ضریب شکست بین هسته ها ایجاد می شود. اگر یکی از این هسته ها به عنوان بازوی مرجع تداخل سنج در نظر گرفته شود و در هسته ی دوم میدان میرا شونده با محیط خارج برهمکنش داشته باشد، با تغییر ضریب شکست محیط پیرامون طیف تداخلی جابجا می شود. میزان حساسیت این حسگر تا حد زیادی وابسته به نفوذ میدان میرا شونده به محیط خارج است که می توان با روش های خوردگی شیمیایی یا سایش یک طرفه ی فیبرنوری میزان آن را افزایش داد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که بیشترین حساسیت بدست آمده برابربا nm/RIU ۱۶۴۳,۸۵ است که می تواند برای ساخت زیست حسگرها بکار رود.

کلید واژه : تداخل سنج ماخ زندر، حسگر فیبر نوری، ضریب شکست، فیبرنوری دو هسته

Simulation Refractive Index Dual Core Fiber Optic Sensor Based on Mach-Zehnder Interferometer

Faezeh Akbari, Mir Hossein Seyed Nazari, Mohammad Ismail zibaii, Hamid latifi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract – In this article a dual-core fiber optic sensor based on mach-zehnder interferometer for measurement refractive index changing is simulated. In this structure one of the cores is doped with germanium and the other with phosphorus. They operate as interferometer arms. Since the length of both arms are equal, interference pattern is formed by the refractive index difference of cores. One of the cores is considered as reference arm and the evanescent field of the other core interacts with surrounding environment. The interference pattern shifts with changing the refractive index of the surrounding environment. The sensor sensitivity is greatly dependent on evanescent field penetration into the external medium which can be increased by chemical etching or side polishing of fiber cladding. Simulation results show that the maximum achieved sensitivity is 643.85 nm/RIU which could be used for fiber optic biosensors.

Keywords: Mach-zehnder interferometer, fiber optic sensor, refractive index sensor, dual core fiber optic

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

۱- مقدمه

امروزه استفاده از حسگر های ضریب شکستی فیبر نوری به دلیل حساسیت بالا در کاربرد های متنوعی که مهم ترین آن ها کاربردهای بیولوزیکی است مورد توجه قرار گرفته اند. تاکنون انواع حسگر های ضریب شکستی فیبرنوری مانند فیبر های باریک شده[1]، کاواک های فابری پرو [2]، توری با تناوب کوتاه (FBG) [3]، توری با تناوب بلند (LPG) [4] طراحی و ساخته شده اند. همچنین از فیبرهای دو هسته بعنوان حسگر ضریب شکست در فیبر های کریستال فوتونی بصورتی که یکی از هسته ها با محلول یا گاز مورد نظر پر شوند مورد استفاده قرار گرفته است [5] که این دسته از حسگر ها حساسیت بالایی دارند ولی روش های ساخت چنین فیبر هایی پیچیده بوده و براحتی قابل دسترس نیستند. هم چنین به دلیل کانال باریک ایجاد شده برای ضریب شکست سنجی هرگونه موادی قابل استفاده نیست. در این مقاله یک فیبرنوری دو هسته ای برای اندازه گیری ضریب شکست مدل سازی شده است که از میدان میرا شونده ی یکی از هسته ها و با نفوذ به محیط خارجی برای اندازه گیری استفاده شده است. مهم ترین مزیت استفاده از فیبر های دو هسته پایداری تداخل سنج مخصوصا در مورد تغییرات دمایی است. از دیگر مزایای این حسگر می توان به ساخت آسان، مقرون به صرفه بودن از نظر اقتصادی، حساسیت بالا و قابل استفاده جهت اندازه گیری چندین کمیت بصورت هم زمان اشاره کرد.

۲- اساس عملکرد حسگر

اساس عملکرد حسگر بر مبنای تداخل سنج ماخ زندر می باشد که رابطه طیف خروجی حسگر با تغییرات فاز بر اساس رابطه زیر است:

$$I_{OUT}(\omega) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi \qquad (1)$$

$$\Delta\varphi = L * \Delta k(\omega) \qquad (2)$$

$$\Delta k(\omega) = k_1(\omega) - k_2(\omega) \qquad (3)$$

که L طول تداخل سنج است. از آن جا که طول تداخل سنج برای هر دو بازو یکسان است، تغییر فاز از جمله ی $\Delta k(\omega)$ به دلیل اختلاف ضریب شکست های بین دو هسته ی فیبرنوری ناشی می شود. زمانی که اختلاف فاز مضرب $2\pi * m$ $((2m+1)*2\pi)$ باشد، بیشینه (کمینه) در طرح تداخلی قابل مشاهده است. اگر از بسط تیلور حول ω_0 برای بسط $\Delta k(\omega)$ استفاده شود آنگاه:

$$\Delta k(\omega) = \Delta k(\omega_0) + (\omega-\omega_0)\frac{\partial \Delta k}{\partial \omega}|_{\omega_0} + (\omega-\omega_0)^2\frac{\partial^2 \Delta k}{2\partial \omega^2}|_{\omega_0} + \ldots \qquad (4)$$

که جمله ی دوم اختلاف بین معکوس سرعت های گروه در دو هسته و جمله ی سوم اختلاف بین پاشندگی سرعت گروه در دو هسته است. لازم به ذکر است که جمله های مرتبه بالاتر بسط تیلور در طول های خیلی کوتاه فیبرنوری دو هسته قابل چشم پوشی است.

در صورتیکه جنس هر دو هسته ی فیبرنوری یکسان باشد الگوی تداخلی بسیار ضعیفی ناشی از خمش و یا فشار اضافی وارد شده بر یک از هسته ها ایجاد می شود ولی در این مورد به دلیل اختلاف زیاد ضریب شکست های دو هسته الگوی تداخلی با نمایانی بالاتری تشکیل می شود.

طبق آزمایش های عملی مشاهده شده نقطه ای در الگوی طرح تداخلی وجود دارد که برای آن اختلاف فاز تقریبا صفر است[6]. اگر فاز حول این نقطه بسط تیلور داده شود می توان از جمله ی دوم ناشی اختلاف بین معکوس سرعت های گروه صرف نظر کرد. در نتیجه فاز یک تابع مربعی با مرکز ω_0 می شود. در صورتیکه میدان میرا شونده ی یکی از هسته ها به محیط خارجی نفوذ کند که این فرایند از

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

طریق یکی از روش های سایش یا خوردگی شیمیایی امکان پذیر است، هرگونه تغییر در ضریب شکست محیط خارجی منجر به تغییر اختلاف ضریب شکست موثر بین هسته ها می شود. عمق نفوذ میدان میرا شونده d_p در غلاف فیبرنوری به صورت رابطه (۵) تعریف می شود:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_{co}^2 \sin^2\theta - n_{cl}^2}} \qquad (5)$$

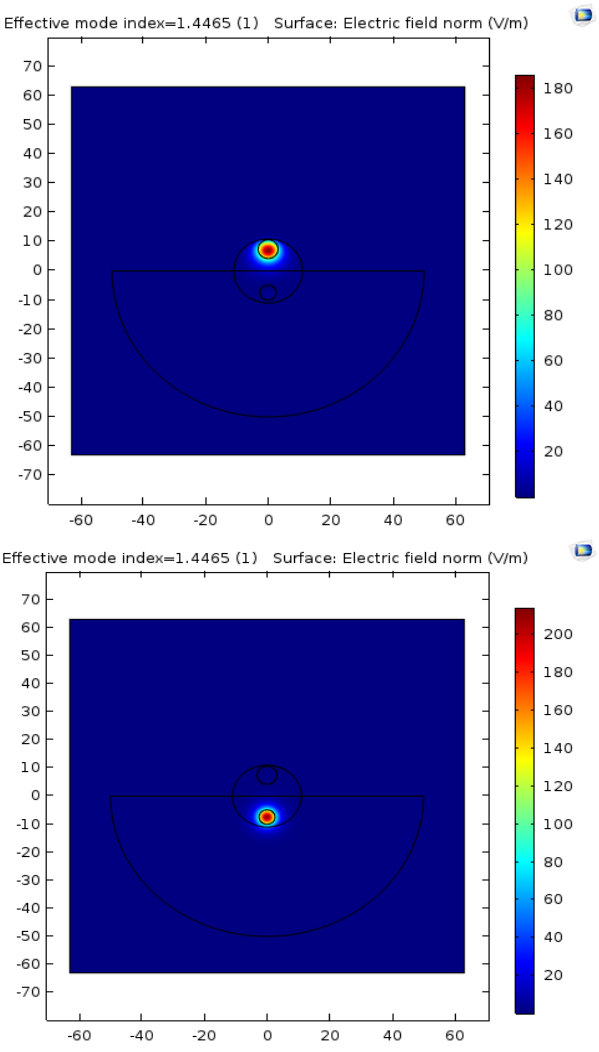
که θ زاویه ی نور فرودی به مرز مغزی و غلاف و λ طول موج نور فرودی را نشان می دهد. اندازه گیری تغییرات ضریب شکست در ناحیه ای از فیبرنوری دو هسته ای که غلاف فیبرنوری نازک شده است صورت می گیرد.

۳- نتایج شبیه سازی حسگر فیبرنوری دو هسته

شبیه سازی برای فیبرنوری دو هسته با مشخصات زیر صورت گرفته است: طول ۵۰ سانتی متر از فیبر دو هسته که یکی از هسته ها که با ژرمانیوم دوپ شده قطر ۵/۱ میکرومتر و ضریب شکست ۱/۴۵۷ و هسته ی دیگر با فسفر دوپ شده با قطر ۶/۴ میکرومتر و ضریب شکست ۱/۴۵۲ است. قطر فیبر ۱۲۵ میکرومتر با ضریب شکست ۱/۴۴۴ می باشد. طول موج قطع در هر دو هسته ۱/۳ میکرومتر است و فاصله ی مراکز دو هسته ۱۴/۹ میکرومتر می باشد که این فاصله میزان کوپل شدگی نور بین هسته ها را به حداقل رسانده و نور بصورت جداگانه در هرکدام از هسته ها منتقل می شود. طول ناحیه ای که بعنوان حسگر در نظر گرفته شده ۲ سانتی متر از فیبرنوری دو هسته است.

شبیه سازی ابتدا جهت اثبات عدم جفت شدگی نور بین هسته ها انجام شده است. در هند سه ای که یک سمت فیبرنوری غلاف نازک تری با قطر ۱۱ میکرومتر داشته باشد، طبق شکل ۱ مشاهده می شود نور در هر کدام از هسته ها بصورت جداگانه منتشر می شود.

با بسط دادن $\Delta k(\omega)$ حول ۱۵۴۰ nm که در مشاهدات تجربی به دست آمده است [6] و به دست آوردن ضریب شکست موثر با تغییر ضریب شکست محیط خارجی پاسخ طیفی حسگر به دست می آید. در مدل سازی انجام شده ضریب شکست محیط خارجی را در بازه ی ۱/۳۶ تا ۱/۳۷ تغییر داده شده و تغییرات طیف تداخلی برای طول موج های ۱۴۵۰ تا ۱۶۵۰ نانومتر بررسی شده است.



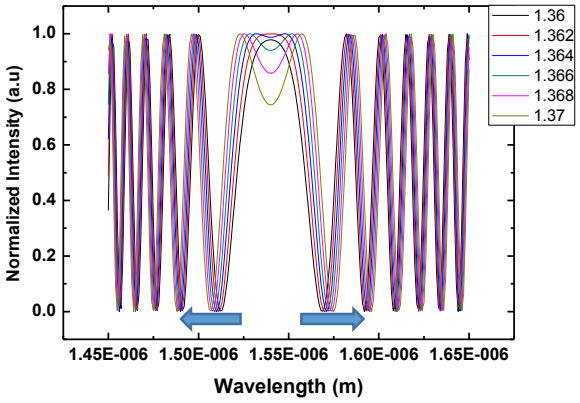
شکل ۱ : توزیع مدی (مد LP_{01}) در دو هسته ی فیبر و عدم جفت شدگی نور بین هسته ها

طبق شکل ۲ جابجایی طول موجی در دو سمت قسمت مرکزی طیف اتفاق می افتد. مشاهده می شودکه با افزایش ضریب شکست دو رفتار متفاوت در طول موج های کوتاه و طول موج های بلند رخ می دهد. کمینه ها و بیشینه های

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

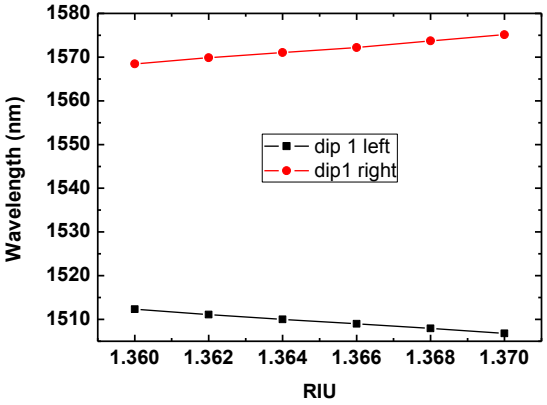
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

اول در هر دو سمت حساسیت بالاتری نسبت به مراتب بعدی دارند.



شکل ۲ : نمودار جابجایی طول موجی طیف تداخلی با تغییر ضریب شکست محیط خارجی در بازه ی ۱,۳۶ تا ۱,۳۷

نمودار حساسیت دو کمینه حول قسمت مرکزی طیف در شکل ۳ نشان داده شده است. حساسیت کمینه ی سمت راست برابر با ۶۴۳/۸۵ nm/RIU و حساسیت کمینه ی سمت چپ برابر با ۵۶۳- nm/RIU است.



شکل ۳ : نمودار حساسیت دو کمینه ی اول سمت راست و چپ ناحیه ی مرکزی طیف

۴- نتیجه گیری

یک فیبرنوری دو هسته که بخشی از غلاف فیبرنوری در یک طرف فیبر برداشته شده، بعنوان حسگر ضریب شکست مدل سازی شده است. دو هسته ی فیبرنوری نقش دو بازوی تداخل سنج ماخ زندر را ایفا کرده و با جفت شدگی نور به درون هر دو هسته ی فیبر یک تداخل سنج درون فیبری تشکیل شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که حساسیت کمینه ی سمت راست ۶۴۳/۸۵ nm/RIU و حساسیت کمینه ی سمت چپ برابر با ۵۶۳- nm/RIU است که نشان دهنده ی رفتار مخالف کمینه های دو سمت است. کمینه ای که در طول موج های بلند تر واقع شده به دلیل نفوذ بیشتر طول موج های بلندتر به محیط پیرامون حساسیت بیشتری دارد. حساسیت کمینه های بعدی در هر دو سمت کاهش می یابد. از رفتار متفاوت طیف در دو سمت می توان به عنوان ابزاری جهت اندازه گیری هم زمان کمیت های مختلف مثل دما و فشار استفاده کرد.

مرجع ها

[1].M.I. Zibaii, et al. "Measuring bacterial growth by refractive index tapered fiber optic biosensor." *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 101.3 (2010): 313-320..

[2]. M. R. André, et al. "Simultaneous measurement of temperature and refractive index using focused ion beam milled Fabry-Perot cavities in optical fiber micro-tips." *Optics Express* 24.13 (2016): 14053-14065.

[3]. W. Liang, et al. "Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors." *Applied physics letters* 86.15 (2005): 151122.

[4]. R. Falciai, , A. G. Mignani, and A. Vannini. "Long period gratings as solution concentration sensors." *Sensors and Actuators B: Chemical* 74.1-3 (2001): 74-77.

[5]. D.K.C.Wu, B.T. Kuhlmey, and B. J. Eggleton. "Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor." *Optics letters* 34.3 (2009): 322-324.

[6]. H.F. Martins, et al. "High-sensitivity dispersive Mach–Zehnder interferometer based on a dissimilar-doping dual-core fiber for sensing applications." *Optics letters* 39.9 (2014): 2763-2766.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]