تداخل‌سنج فابری پرو با حساسیت دمایی بالا با استفاده از حسگر پلیمری فیبر نوری

پگاه زرافشانی[۱و۲]، امیدرضا رنجبر نائینی[۱]، اعظم لایقی[۱]، فروغ جعفری[۱]، حمید لطیفی[۱و۲]

۱. پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

در این مقاله حسگر فیبر نوری پلیمری بر اساس تداخل سنج فابری پرو ارائه شده است. حساسیت بالای دمایی، ساخت آسان، اندازه‌ی کوچک و محکم بودن از مزایای این حسگر می‌باشد. ساختار اصلی این حسگر یک استوانه از جنس *PDMS* است که سر فیبر نوری تک مد قرار گرفته و درون این استوانه یک گاف هوا به طول تقریبی ۲۰۰ میکرومتر ایجاد شده است. با استفاده از تبدیل فوریه و تفکیک فرکانس فضایی مربوط به کاواک، حساسیت دمایی حسگر برابر با *nm/°C* ۱۵ به دست آمد.

کلید واژه : پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، تداخل‌سنج فابری پرو، حسگر دما، حسگر فیبر نوری

Fabry–Perot interferometry with ultra-high temperature sensitivity using polymer optical fiber

Pegah Zarafshani[1,2], Omid Reza Ranjbar-Naeini[1], Aazam Layeghi[1], Forugh Jafari[1], Hamid Latifi[1,2]

1. Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
latifi@sbu.ac.ir

In this paper, the optical fiber sensor based on the Fabry Perot interferometer has been proposed. High temperature sensitivity, easy construction, robust and small size are the advantages of this sensor. The main structure of this sensor is a PDMS cylinder and within this cylinder there is an air gap with an approximate length of 220 microns. The sensitivity of the air gap is equal to 15 nm / ° C.

Keywords: PDMS, fabry-perot interferometer, optical fiber sensor, temperature sensor

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

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

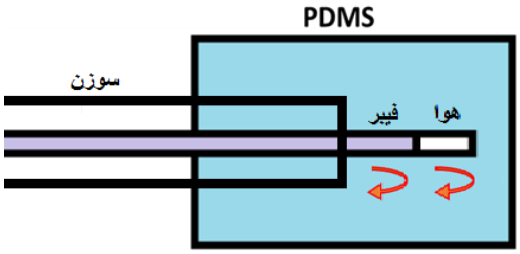
۱- مقدمه

مبحث حسگرهای فیبر نوری از حدود نیم قرن پیش شروع شده است و به خاطر مزایای زیاد آن از جمله اندازه کوچک و فشرده، دقت بالا و مصونیت از امواج الکترومغناطیسی، با سرعت بالایی در حال گسترش می-باشد[۱]. این حسگرها به کمک انواع ساختارهای انبوه و جدید، پتانسیل زیادی برای تقویت حساسیت دارند. در این میان گروه حسگرهای فابری پرو به خصوص انواع پلیمری آن حساسیت بالایی در حوزه‌ی تغییرات دمایی از خود نشان داده‌اند. این امر به جهت خواص این مواد و به طور خاص PDMS در مقابل ماده‌ی سیلیکا و هوا می‌باشد. به طور مثال حسگر LPG لایه‌نشانی شده با PDMS دارای حساسیت 250pm/C است که ۵ برابر بیشتر از LPG معمولی می‌باشد[۲]. همچنین حسگر توری براگ لایه نشانی شده با این ماده نیز ۴,۲ برابر بیشتر از توری معمولی می‌باشد[۳]. به عنوان نمونه‌ای دیگر حسگر نازک‌شده‌ی خمیده که در قالب PDMSی محدود شده است دارای حساسیت -6.25 nm/C می‌باشد[۴] و شکل S آن دارای حساسیت -2.17 nm/C است[۵]. همچنین حسگر پلیمری با کاواک میکرو کره هوا دارای حساسیت بالای 5.013nm/C است[۶].

در این مقاله حسگری با ساختار استوانه‌ای از جنس پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان ارائه شده است. این حسگر دارای یک کاواک هوا درون خود می‌باشد و اساس کارکرد آن بر پایه‌ی فابری‌پرو است.

۲- تئوری حسگر

حسگر تار نوری ارائه شده در تصویر شکل ۱ نشان داده شده است. پرتوهای نور از گاف هوای موجود بین تار نوری و PDMS بازتاب شده و داخل فیبر نوری تزویج می شوند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است حسگر دارای دو سطح مرزی می‌باشد که عبارتند از سطح مشترک فیبر و هوا و سطح مرزی بین هوا و محیط پلیمری.



شکل ۱: شماتیک حسگر استوانه‌ی پلیمری

هنگامی‌که نور از منبع نوری به درون فیبر منتشر می‌شود، با برخورد به هریک از این سطوح بازتاب کرده و در نهایت پرتوهای بازتابی از سطوح، مجددا به درون فیبر تزویج شده و با یکدیگر تداخل می‌کنند. با توجه به معادلات فرنل، ضریب بازتاب دو سطح درگیر در حسگر به ترتیب برابر با ۰,۰۳۵ و ۰,۰۲۸ می باشند. به سبب همین کوچک بودن مقدار ضریب بازتاب‌ها، می‌توان از بازتاب‌های مرتبه-های بالاتر چشم‌پوشی کرده و فقط دو پرتو بازتابی مرتبه اول را با یکدیگر جمع بست تا نتیجه‌ی تداخل حاصل شود. در این حالت شدت تداخل نهایی برابر با رابطه‌ی زیر خواهد بود[۶]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(2k_0 nd + \varphi_0) \quad (۱)$$

در این رابطه، I_iها شدت‌های بازتابی از هر یک از سطوح می‌باشند. همچنین n، d و φ_0 به ترتیب نشان‌دهنده ضریب شکست، طول کاواک هوا و فاز اولیه است. هر تغییری در فاز تابع کسینوسی رابطه (۱) می‌تواند طیف تداخلی حسگر را جابه‌جا کند. تغییرات دمای محیط پیرامون حسگر، به دو طریق منجر به تغییرات فاز می‌شود؛ یکی از طریق تغییر ضریب شکست و دیگری تغییر طول کاواک. هریک از عوامل فوق بسته به میزان ضریب ترمو-اپتیک و ضریب انبساط گرمایی محیط های درگیر در حسگر می‌تواند تاثیر متفاوتی در جابجایی طیف و درنتیجه حساسیت حسگر داشته باشد. با توجه به جمله‌ی تداخلی رابطه‌ی (۱)، تغییرات فاز به ازای تغییرات دمایی به صورت زیر خواهد بود[۸]:

$$\Delta\varphi / \Delta T = 2k_0 d \frac{d}{dT}(n) + 2k_0 n \frac{d}{dT}(d) \quad (۲)$$

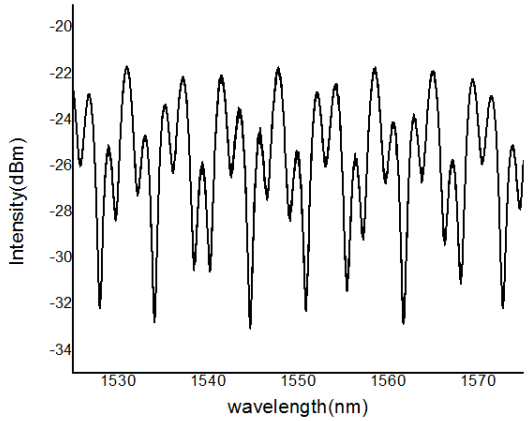
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

عبارت اول در معادله (۲) مربوط به ضریب ترمو-اپتیک و عبارت دوم مربوط به ضریب انبساط گرمایی محیط‌های درگیر در حسگر می‌باشد. از آنجا که ضریب انبساط گرمایی PDMS در مقایسه با سایر مواد از جمله سیلیکا بزرگ می‌باشد(در حدود $0.0002\ ^{\circ}C^{-1}$)، به همین سبب حسگر فوق حساسیت دمایی بالایی از خود نشان می‌دهد.

۳- ساخت حسگر

در ساختار حسگر فیبر نوری ارائه شده در این مقاله، پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان(PDMS) نقش اصلی را ایفا می‌کند. برای ساخت این حسگر ابتدا مواد سفت‌کننده و پایه Sylgard 184 - Silicone elastomer به نسبت 1:10 با یکدیگر ترکیب شده و قالب استوانه ای به شعاع ۳میلیمتر با آن پر شد. سپس فیبر نوری که سر آن صاف بریده شده به همراه سوزن جهت استحکام حسگر در مرکز استوانه و به ارتفاع مناسبی از کف قالب قرار گرفت. سپس قالب به مدت ۹۰ دقیقه درون فر در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا PDMS سفت شده و به حالت جامد درآید. در ادامه، حسگر استوانه‌ای از قالب جدا شده و با عقب کشیدن فیبر، گاف هوایی با طول مناسب درون آن ایجاد می‌شود. در نهایت فیبر نوری را به انتهای سوزن چسبانده تا فیبر در جای خود ثابت شود. طیف نهایی حسگر پلیمری ساخته شده در شکل (۲) نشان داده شده است. طول کاواک هوا در این حسگر ۲۰۰ میکرومتر می‌باشد(با استفاده از روش تبدیل فوریه).

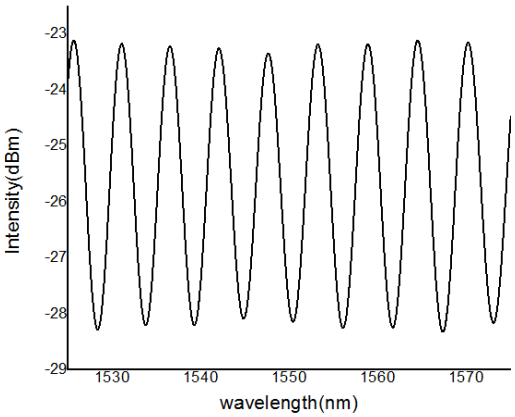


شکل ۲: طیف تداخلی بازتابی حسگر پلیمری

پس از اتمام فرآیند ساخت، حسگر مربوطه تحت آزمایش دمایی قرار گرفت. برای این منظور از لیزر پهن‌باند استفاده شده است؛ نور فرودی پس از بازتاب از مرزهای درون حسگر و تداخل با یکدیگر، در نهایت درون فیبر تزویج شده و توسط طیف‌سنج مشاهده شده است.

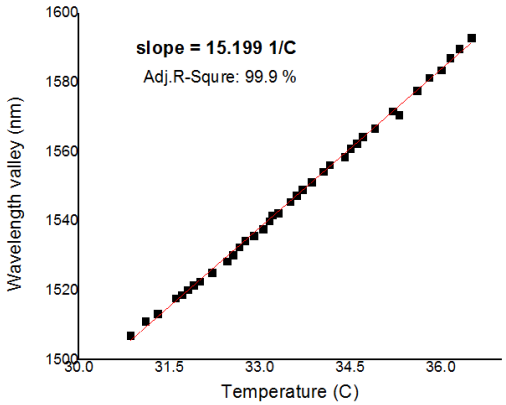
۴- تحلیل طیف حسگر در پاسخ دمایی

به منظور تحلیل پاسخ حسگر در مقابل تغییرات دمایی، ابتدا از طیف تداخلی تبدیل فوریه گرفته می‌شود. در ادامه، با استفاده از فیلتر میان گذر، نمودار مربوط به کاواک هوای این حسگر از طیف مدوله شده‌ی شکل (۲) استخراج می‌شود که حاصل آن در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف فیلتر شده مربوط به کاواک هوا

پس از فیلترکردن کاواک هوا، شیفت طول موجی نمودار مربوطه را در اثر تغییرات دمایی در بازه‌ی ۳۰ درجه الی ۴۰ درجه‌ی سانتی گراد بررسی می‌کنیم. در نهایت، با دنبال کردن یکی از اکسترمم‌های طول موجی، نتایج تحلیل طیف در نمودار شکل زیر ارائه شده است.



شکل ۴: جابجایی اکسترمم طول موجی بر اثر تغییرات دمایی برای کاواک هوای حسگر

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

پاسخ دمایی حسگر استوانه‌ای پلیمری نشان می-دهد حساسیت دمایی کاواک هوا برابر با ۱۵,۱۹۹nm/°C می‌باشد که در مقایسه با حسگرهای فیبرنوری ساخته شده، از حساسیت بالایی برخوردار است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ساخت حسگر فیبر نوری با حساسیت دمایی بالا از جنس PDMS پرداخته شد. اساس عملکرد این حسگر بر پایه‌ی تداخل‌سنج فابری‌پرو می‌باشد. در ادامه با فیلتر کردن طیف و تحلیل این گاف به طور جداگانه به حساسیت دمایی **۱۵,۱۹۹ nm/°C** برای حسگر مذکور دست یافتیم.

مراجع

[1] S. Y. Yin, Francis T. S. and E. Udd, *Overview of Fiber Optic Sensors*. 2002.

[2] Q. Wang, C. Du, J. Zhang, R. Lv, and Y. Zhao, "Sensitivity-enhanced temperature sensor based on PDMS-coated long period fiber grating," *Opt. Commun.*, vol. 377, pp. 89–93, 2016.

[3] C.-S. Park, K.-I. Joo, S.-W. Kang, and H.-R. Kim, "A PDMS-Coated Optical Fiber Bragg Grating Sensor for Enhancing Temperature Sensitivity," *J. Opt. Soc. Korea*, vol. 15, no. 4, pp. 329–334, 2011.

[4] P. Munendhar, L. Zhang, L. Tong, and S. Yu, "Highly Sensitive Temperature Sensor Using Intrinsic Mach-Zehnder Interferometer formed by Bent Micro-Fiber Embedded in Polymer," vol. 10323, pp. 12–15, 2017.

[5] R. Yang *et al.*, "PDMS-coated S-tapered fiber for highly sensitive measurements of transverse load and temperature," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3429–3435, 2015.

[6] O. Science, "Highly sensitive temperature sensor based on cascaded polymer-microbubble cavities by employing a subtraction between reciprocal thermal responses," vol. 24, no. 18, pp. 14245–14250, 2016.

[7] Y. Zhang, H. Shibru, K. L. Cooper, and A. Wang, "Miniature fiber-optic multicavity Fabry–Perot interferometric biosensor,"Blacksburg Virginia, 2005.

[8] G. B. Hocker, "Fiber-optic sensing of pressure and temperature," *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 9, p. 1445, 1979.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-14]

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