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

بررسی اثر دما روی شدت بازتابی کاواک فیبری تداخل‌سنج فابری-پرو مبتنی بر تار نوری بلور فوتونی

فاطمه شهشهانی، معصومه میرخندان

گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا(س)، تهران

چکیده –در این مقاله، اثر دما روی شدت بازتابی کاواک فیبری فابری– پرو مبتنی بر ساختار بلور فوتونی به‌طور تئوری بررسی شده است. مدل‌سازی بر اساس برهم‌نهی دو مد مختلف و وابستگی توان بازتابی فیبر نوری به دما انجام شده است. محاسبات عددی نشان می‌دهد دو مد با طول موج ۱/۵ و ۱/۶ میکرومتر در بازه‌ی ۲۵ تا ۲۳۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین حساسیت را به دما نشان می‌دهد.

کلید واژه- تار بلور فوتونی، تداخل‌سنج فابری-پرو، حسگر دما، فیبر نوری.

Analysis of Temperature Effect on the Reflected Optical Intensity of Fabry-Perot Interferometer Based on the Photonic Crystal fiber

Fateme Shahshahani, Masome Mirkhandan

Department of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, the operation of Fabry-Perot optical fiber based on photonic crystal structure considering the temperature variations is theoretically analyzed. Modeling has been done on basis of the superposition of two modes with different wavelengths and the temperature dependence of reflected optical intensity. Numerical calculations show that the superposition of two modes with wavelengths 1.5 µm and 1.6 µm, has the most temperature sensitivity in the range of 25°C to 235℃.

Keywords: photonic crystal fiber, Fabry-Perot interferometer, temperature sensor, fiber optic.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

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

۱- مقدمه

استفاده از تارهای بلور فوتونی به علت حجم کم، قابلیت شبکه‌سازی، تاثیرناپذیری از میدان‌های الکترومغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی با مواد شیمیایی و قابلیت اندازه‌گیری از راه دور، در مخابرات نوری و صنایع مختلف روز به روز بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. این تارها، برخلاف فیبرهای معمولی، فقط از یک ماده ساخته شده‌اند. همچنین، تنوع مؤلفه‌های هندسی تارهای بلور فوتونی مانند اندازه و فاصله حفره‌ها، موجب انعطاف بیشتر آنها در طراحی المان‌های فیبری می‌شود [۱].

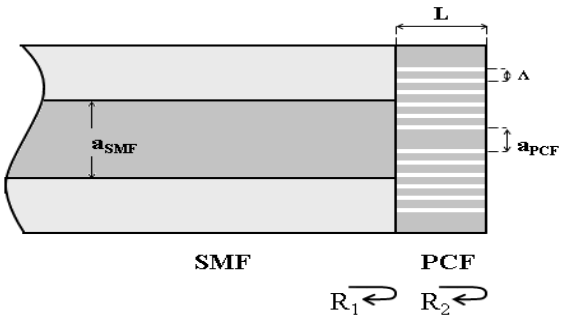
سنجش دقیق ضریب شکست، دما، فشار و حسگرهای تعیین نوع گاز، بوسیله ساختارهای فیبر نوری مبتنی بر بلور فوتونی، این نوع حسگر را از حسگرهای دیگر متمایز ساخته است. حسگرهای فیبر نوری، معمولا بر مبنای تداخل‌سنجی یا فیبر توری براگ[1] طراحی می‌شوند[۳-۲].

سازوکار حسگر فیبر نوری می‌تواند بر اساس هر یک از مؤلفه‌های شدت، بسامد، قطبش و یا فاز نور بازتابی باشد. حسگرهایی که بر مبنای شدت موج کار می‌کنند، از امتیازاتی مانند روش استفاده آسان و قیمت پایین نیز برخوردارند [۴].

در این مقاله، اثر دما روی شدت نور بازتابی از یک فیبر نوری بلور فوتونی که در انتهای یک فیبر نوری تک‌مد استاندارد (SMF[2]) قرار گرفته، بررسی شده است. شبیه سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. در بخش دوم مقاله مبانی نظری بطور مختصر ذکر شده، در بخش سه به بررسی نتایج عددی پرداخته شده است. در بخش آخر نتیجه‌گیری پژوهش ارائه شده است.

۲- مبانی نظری

در شکل ۱ طرح ساده‌ای از تار بلور فوتونی شبیه‌سازی‌شده در این پژوهش نشان داده شده است[3]. تار بلور فوتونی از جنس سیلیکا و طول آن برابر ۰/۵ mm، ثابت شبکه ۲ μm و شعاع هسته‌ی جامد آن $\frac{2}{\sqrt{3}}$ μm است. همچنین، فیبر تک‌مد، هسته‌ای از جنس سیلیکا و شعاعی برابر با شعاع هسته‌ی جامد تار بلور فوتونی، $\frac{2}{\sqrt{3}}$ μm داراست. روزنه عددی فیبر تک‌مد ۰/۲ در نظر گرفته شده است. ضریب شکست و ضریب انبساط خطی سیلیکا به ترتیب ۱/۴۵۷۵ [۳]و ۲/۵nm/℃ انتخاب شده‌اند. تغییرات دمایی ضریب شکست نیز ۱/۱۹×۱۰$^{-۶}$/℃ است [۵].



شکل ۱: ساختار فابری-پرو استفاده شده در شبیه‌سازی. a_{SMF} شعاع فیبر تک‌مد ، a_{PCF} شعاع هسته جامد تار بلور فوتونی ، L طول PCF، Λ ثابت شبکه، R_1 ضریب بازتاب سطح جداکننده فیبر تک مد و تار بلور فوتونی و R_2 ضریب بازتاب دیواره‌ی انتهایی تار بلور فوتونی است.

برای محاسبه‌ی ضریب شکست مؤثر غلاف تار بلور فوتونی، n_{FSM}[4]، روش ضریب شکست موثر[5] شبیه سازی شده و شعاع مؤثر هر سلول واحد از رابطه‌ی $r=\sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}}\Lambda$ بدست آمده است [۶]. همچنین ضریب شکست مؤثر کل فیبر تک‌مد و تار بلور فوتونی با بدست آوردن مد مجاز منتشر شده در آنها محاسبه می‌شود[6] [۷].

جدول ۱: ضرایب شکست فیبر تک‌مد و تار بلور فوتونی برای هریک از طول موج‌های تداخلی با در نظر گرفتن نسبت قطر حفره به فاصله حفره‌ها، d/Λ. ستون دوم ضریب شکست مؤثر فیبر تک‌مد (n_{SMF}). ستون سوم ضریب شکست مؤثر غلاف تار بلور فوتونی (n_{FSM}) و ستون چهارم ضریب شکست مؤثر تار بلور فوتونی (n_{PCF})است.

d/Λ=0.5	n_{SMF}	n_{FSM}	n_{PCF}
λ_1=1.3 μm	1.4448	1.4189	1.4332
λ_3=1.5 μm	1.4442	1.4124	1.4272
d/Λ=0.6			
λ_2=1.4 μm	1.4444	1.3946	1.4249
λ_3=1.5 μm	1.4442	1.3899	1.4210

[1] Fiber Brag Grating
[2] Single Mode Fiber
[3] این ساختار در مرجع (۳) برای ساخت حسگری بر مبنای درصد بازتاب قابری-پرو پیشنهاد و ساخته شده است.

[4] Effective index of the Fundamental Space-filling Mode
[5] Effective Index Method
[6] برای مطالعه دقیق روش محاسبه به مرجع ۶و۷ مراجعه شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

λ_4=1.6 μm	1.4440	1.3855	1.4171

محل اتصال دو فیبر، به‌طور طبیعی مانند آینه عمل می‌کند، اما فقط بخشی از نور بازتاب می‌گردد. ضریب بازتاب سطح جداکننده فیبر تک مد و تار بلور فوتونی، R_1، و دیواره‌ی انتهایی تار بلور فوتونی، R_2، (شکل۱) با استفاده از معادلات فرنل محاسبه می‌شوند.

$$R_1 = \frac{(n_{SMF} - n_{PCF})^2}{(n_{SMF} + n_{PCF})^2} \quad (۱)$$

$$R_2 = \frac{(n_{PCF} - n_{air})^2}{(n_{PCF} + n_{air})^2}، \quad (۲)$$

که در آن n_{air} ضریب شکست هوا و برابر ۱ است [۸]. شدت بازتابی کل تداخل‌سنج فابری-پرو که در این مقاله تار بلور فوتونی است،از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}\cos\Phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2}\cos\Phi} \quad (۳)$$

که در آن ϕ، تغییرات فاز در تداخل‌سنج، نیز برابر است با [۹]

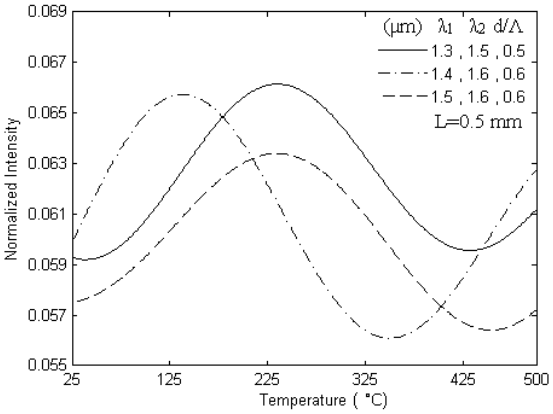
$$\Phi = \frac{4\pi n_{PCF} L}{\lambda_i}. \quad (۴)$$

در اثر افزایش دما سیلیکا منبسط شده و طول تار بلور فوتونی افزایش می‌یابد. ضریب شکست موثر تار بلور فوتونی نیز با ضریب $۱/۱۹\times۱۰^{-۶}$/℃ بیشتر خواهد شد. در نتیجه تغییرات فاز در تداخل‌سنج تغییر کرده و شدت موج تداخلی بازتابی، در رابطه ۳، تابعی از دما خواهد بود.

۳- بررسی نتایج عددی

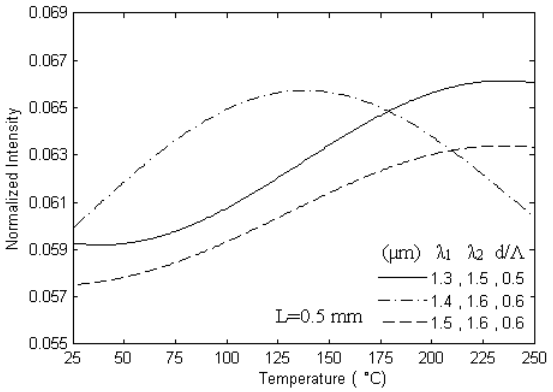
ضریب شکست مؤثر ساختار بلور فوتونی با استفاده از روش ضریب شکست مؤثر برای نسبت‌های d/Λ=۰/۵ و d/Λ=۰/۶ محاسبه و در جدول ۱ درج شده است. طبق محاسبات، وابستگی دمایی ضریب شکست موثر فقط به مقدار ۰/۰۰۰۱ واحد تغییر ایجاد می‌کند، که قابل چشم‌پوشی است. در شکل۲ تغییرات شدت بهنجار موج بازتابی حاصل از برهم نهی دوتایی مدهای مختلف با طول موج‌های ۱/۳μm، ۱/۴μm، ۱/۵μm و ۱/۶μm در تار نوری بلور فوتونی که نسبت‌های d/Λ آن‌ها برابر ۰/۵ و ۰/۶ در نظر گرفته شده، در بازه دمایی ۵۰۰-۲۵ درجه سانتیگراد نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تغییرات شدت بهنجار موج بازتابی از PCF نسبت به دما رفتار سینوسی دارد. برای بهتر مشخص شدن قسمت خطی نمودارها، در شکل ۳ بازه‌ی دمایی به ۲۵۰ ℃ کاهش داده شده است.



شکل ۲: شدت موج تداخلی بازتابی بهنجار برحسب دما (۲۵℃-۵۰۰ ℃)

از شکل ۳ می‌توان دریافت که برهم‌نهی دو طول موج λ_1=۱/۳μm و λ_2=۱/۵μm با d/Λ=۰/۵ و برهم‌نهی طول موج های λ_1=۱/۵μm و λ_2=۱/۶μm با d/Λ=۰/۶ در بازه ۲۵۰-۲۵ درجه سانتیگراد تغییرات خطی دارند. بازه دمایی تغییرات خطی شدت بهنجار برای برهم‌نهی دو طول موج λ_1=۱/۴μm و λ_2=۱/۶μm با d/Λ=۰/۶ در محدوده ۱۲۵-۲۵ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد.

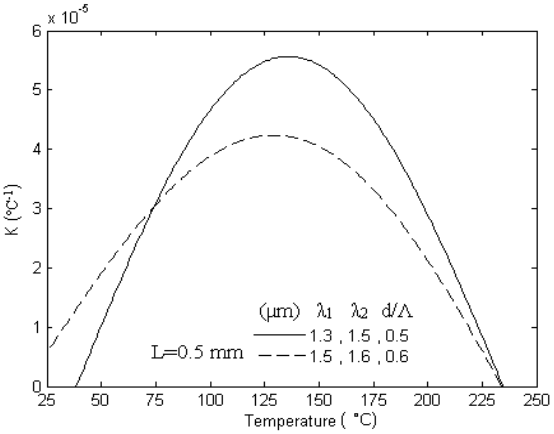


شکل ۳: شدت موج بازتابی تداخلی بهنجار برحسب دما(۲۵℃-۲۵۰ ℃)

در شکل ۴ شیب تغییرات شدت بهنجار بر حسب دما ($K=dI/dT$ °C^{-1}) نشان داده شده است. کمیت شیب در

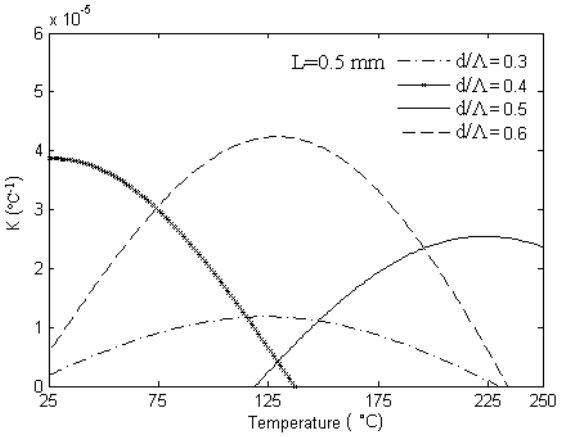
[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]

اینجا نشان‌دهنده‌ی حساسیت دمایی شدت موج بازتابی به دما است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین حساسیت، در بیشینه‌ی منحنی روی می‌دهد. نقطه‌ی صفر این نمودارها نیز بیان‌کننده‌ی عدم تغییر شدت نسبت به دما است.



شکل ۴: حساسیت دمایی شدت موج تداخلی بازتابی بهنجار برحسب دما

با توجه به شکل‌های ۳ و ۴، می‌توان نتیجه گرفت که شدت بهنجار حاصل از برهم‌نهی طول موج‌های λ_1=۱/۳μm و λ_2=۱/۵μm با d/Λ=۰/۵ حسگر دمایی مناسبی برای دمای کمتر از ۵۰℃ نیست. در حالیکه فیبر نوری بلور فوتونی با دو طول موج λ_1=۱/۵μm و λ_2=۱/۶μm با d/Λ=۰/۶ حساسیت دمایی کمتری از خود نشان می‌دهد.



شکل ۵:شدت موج تداخلی بازتابی بهنجار برحسب دما با نسبت‌های مختلف d/Λ

تغییرات ضریب حساسیت دمایی، K، به دما برای دو طول موج λ_1=۱/۵μm و λ_2=۱/۶μm به‌ازای نسبت‌های مختلف d/Λ، در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضریب K به ازای d/Λ=۰/۶ در بازه‌ی وسیع‌تری از دما تغییرات دارد.

۴- نتیجه‌گیری

تغییرات شدت بهنجار موج بازتابی از یک تار نوری بلور فوتونی، حاصل از برهم‌نهی دوبه‌دوی مدهای مختلف با طول موج‌های ۱/۳μm، ۱/۴μm، ۱/۵μm و ۱/۶μm بر حسب دما، بررسی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که فیبر بلور فوتونی به ازای برهم نهی دو طول موج λ_1=۱/۵μm و λ_2=۱/۶μm با d/Λ=۰/۶ در بازه دمایی ۲۵℃ تا ۲۳۵℃ ضمن ایجاد بیشترین تغییرات شدت در موج بازتابی، بزرگترین بازه دمایی را به‌طور یک‌به‌یک پوشش می‌دهد.

مراجع

[1] Wang R., Yao J., Miao Y., Lu Y., Xu D., Luan N., Musideke M., Duan L., and Hao C., *A reflective photonic crystal fiber temperature sensor probe based on infiltration with liquid mixtures*, **Sensors**, vol. 13, no. 6 (2013) 7916–25.

[2] Harun S. W., Yasin M., Rahman H. A., Arof H., *Fiber Optic Temperature Sensors*, www.**INTECH**open.com (2008).

[3] Ding W., and Jiang Y., *Miniature Photonic Crystal Fiber Sensor for High-Temperature Measurement*, **IEEE Sensors Journal**, vol. 14, no. 3 (2014) 786–789.

[4] Annamdas V., *Review on Developments in Fiber Optical Sensors and Applications*, vol. 1, no. 1 (2012) 1–16.

[5] Laouar R., Colby E., England J., Noble R., *Measurement of thermal dependencies of PBG fiber properties*, Conf.Proc. C110328 ,**SLAC-PUB, Stanford Uni**, (2011) 1343-1345.

[6] Li Y. F., Wang C. Y., Wang Z. H., Hu M. L., and Chai L., S*olution of the fundamental space filling mode of photonic crystal fibers: numerical method versus analytical approaches*, **Applied Physics B**, vol. 85, no. 4 (2006) 597-601.

[7] Mitschke F., *Fiber Optics*, p. 35, Springer, 2009.

[8] Tsai W.and Lin C., *A Novel Structure for the Intrinsic Fabry – Perot Fiber-Optic Temperature Sensor*, **IEEE journal of lightwave technology**, vol. 19, no. 5 (2001) 682–686.

[9] Thompson B. J., *Fiber Optic Sensors*, p. 37, CRC, 2008.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-11-01]