



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



## بررسی اثرات حرارتی بر روی میکرو تشدیدگر فابری پرو هیبریدی ساخته شده با تار نوری سوخته

فاطمه حامدی<sup>۱</sup>، امیدرضارنجبرنائینی<sup>۱</sup>، امیرحیدری آذر<sup>۱</sup>، حمید لطیفی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده لیزر پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

در این مقاله حسگر فیبرنوری هیبریدی براساس تداخل سنج فابری پرو ارائه شده است. حسگر از دو کاواک فابری پرو مجزا تشکیل شده است: کاواک هوا و کاواک هواوسیلیکا. که هر یک حساسیت متفاوتی دارند. با جوش دادن فیبر تک مد و فیبر آسیب دیده بر اثر سوختگی (fused fiber) یک میکرو کاواک در ناحیه مغزی فیبر ایجاد می شود. حساسیت دمایی  $9 \text{ pm/C}$  و  $13 \text{ pm/C}$  در بازه دمایی  $60$  تا  $90$  درجه سانتی گراد با استفاده از تبدیل فوریه و تفکیک فرکانس فضایی مربوط به کاواک بدست آمده است. از ویژگی های این حسگر می توان به ساخت ساده، مقرون به صرفه، اندازه کوچک، محکم بودن و حساسیت دمایی بالا اشاره نمود.

کلید واژه- حسگر کاواک فابری پرو، فیبر سوخته

### The Investigation of temperature response of the Hybrid Fabry\_perot micro cavity sensor fabricated with Catastrophic fuse effect

Fatemeh Hamedi<sup>1</sup>, Omid R Ranjbar-Naeini<sup>1</sup>, Amir Heidariazar<sup>1</sup>, Hamid Latifi<sup>1</sup>

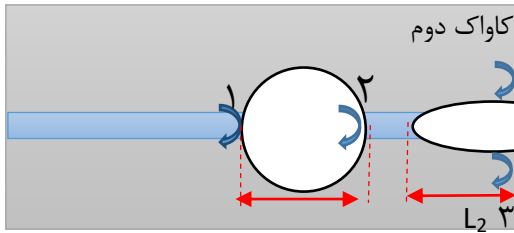
<sup>1</sup> Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Physics, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

latifi@sbu.ac.ir

The fabrication of a Hybrid Fabry Perot microcavity with a fiber destroyed by the catastrophic fuse effect is reported here. The sensor consists of two different cavities; an air cavity and the combination of the air and the silica cavity. Different cavity responses are extracted by using the Fast Fourier transform Method. temperature response of each individual cavity is also analyzed separately. The temperature sensitivity of  $\sim 9 \text{ pm/}^\circ\text{C}$  and  $\sim 13 \text{ pm/}^\circ\text{C}$  are obtained for hybrid and air cavity interferometer respectively in the temperature range of  $60$  to  $90$   $^\circ\text{C}$ . the sensor possesses some intrinsic properties such as simple fabrication procedure, cost-effective commodity, small size, solidity and high temperature sensitivity that makes it a good candidate for simultaneous measurement applications.

Keywords: Fabry Perot cavity, fused fiber, temperature sensor



شکل ۱) شماتیک حسگر

می باشد که حساسیت هر کدام جداگانه در این مقاله بررسی شده است.

### تئوری حسگر

حسگر کاواک فابری\_پرو در تصویر (شکل ۱) نشان داده شده است دارای سه سطح بازتابنده که عبارتند از فصل مشترک سیلیکاهوا (سطح اول)، سطح مشترک هوا سیلیکا (سطح دوم) و سطح مشترک سیلیکاهوا (سطح سوم) می باشد. نور پس از برخورد به سطح ۱ بر اثر بازتاب فرنل به درون مغزی برگشت داده می شود و در ادامه  $0.96/5$  باقی مانده وارد کاواکی با طول  $82$  میکرومتر می شود، و به سطح ۲ برخورد کند و دوباره  $0.96/5$  از آن وارد کاواک دوم می شود و بعد از برخورد به سطح ۳،  $0.3/5$  از آن بازتابیده و  $0.96/5$  از سطح ۳ خارج می شود. شدت بازتابی کل جمع شده به درون فیبر نوری به صورت زیر است [6]:

$$I_{Total} = \left| \frac{E_r}{E_0} \right|^2 = R_1 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 + (1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2)^2 (1 - R_1)^2 (1 - R_2)^2 R_3 + 2\sqrt{R_1 R_3} (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) (1 - R_1) (1 - R_2) \cos[2(\phi_1 + \phi_2)] + 2\sqrt{R_2 R_3} (1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2) (1 - R_1)^2 (1 - R_2) \cos(2\phi_2) + 2\sqrt{R_1 R_2} (1 - \alpha_1) (1 - R_1) \cos(2\phi_1)$$

$$\phi_1 = \frac{4\pi n_{air} L_1}{\lambda} \quad \phi_2 = \frac{4\pi n_{effective} L_2}{\lambda} \quad (1)$$

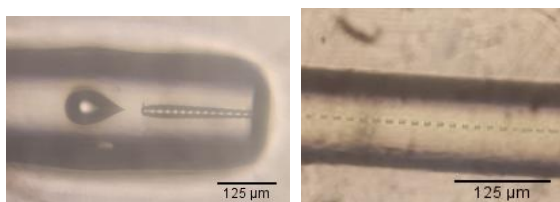
اختلاف فاز ایجاد شده،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضریب اتلاف عبوری،  $n$  ضریب شکست درون کاواک،  $k_0$  ثابت انتشار است. با توجه

### مقدمه

امروزه اندازه گیری دما توسط انواع مختلفی از حسگرهای تار نوری انجام می شود. در این میان، حسگر FBG بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است که دارای حساسیت دمایی  $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$  می باشد [1]. اخیراً، تداخل سنج فیبری با هندسه چندمغزی برای اندازه گیری حساسیت دمایی گزارش شده است که از انواع آنها می توان تداخل سنج چندمد [2]، فیبرهای نازک شده [3]، فیبر با مغزی نازک [3] را نام برد. هر چند این ساختارها ساده هستند ولی حساسیت دمایی و تکرارپذیری کم و حساسیت به تنش بالایی دارند که منجر به همپوشانی حساسیت ها می شود. در این میان حسگر دمایی برپایه تداخل سنج فابری پرو مطالعه شده است که به واسطه ساختار ساده، انعطاف پذیری بالا، ابعاد کوچک و توانایی همزمان سنجی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. حسگرهای تداخل سنج فابری پرو باتکنیک های مختلف ساخته شده مثل حسگر فابری\_پرو داخلی خورده شده با هیدروکلریک اسید [4]، قراردادن دو FBG، فیبرهای فوتونیک کریستال [5] یا فیبر بدون هسته که بین دو فیبر تک مد ساندویچ شده اند [5]. که در این موارد افزایش حساسیت و یا اندازه گیری دمای بالا را دارد ولی استفاده از فیبرهای مخصوص هزینه بالا، قابلیت ساخت دوباره کم بخاطر دقت بالا در حین ساخت لازم دارد و مراحل ساخت پیچیده از معایب این حسگرهاست.

در این مقاله با استفاده از روشی جدید، ساده و مقرون به صرفه حسگر فابری\_پرو از فیبر سوخته ساخته شده است. این حسگر دارای یک کاواک هوا و یک کاواک هیبریدی

دهند (شکل ۲ الف)) در مرحله بعد، در فاصله چند میکرومتر بعد از کاواک اول با استفاده از دستگاه جوش فیبرنوری، کاواک دوم ساخته می شود (شکل ۲ ب)) طول کاواک نهایی ۳۵۰ میکرومتر است. به منظور بررسی پاسخ دمایی، حسگر درون کوره دمایی قرار داده شده است که در آن دما تا ۹۰ درجه سانتی گراد افزایش می یابد و سپس رفتار کاهشی دما مورد بررسی قرار می گیرد. در محدوده تغییرات دمایی ۳۰ درجه سانتی گراد طیف حسگر با دستگاه braggmeter مشاهده و ثبت شده است.



الف ب

شکل ۲ (الف) فیبر سوخته ب) کاواک نهایی که از یک کاواک هوا به طول ۸۲ μm و بیشترین عرض ۸۰ μm و کاواک هیبریدی با طول ۳۵۰ μm

### تحلیل طیف حسگر در پاسخ دمایی

برای تحلیل طیف در مقابل تغییرات دمایی ابتدا از طیف طول موج تبدیل فوریه می گیریم. (شکل ۳) در ادامه با استفاده از فیلتر میان گذر نمودار مربوط به دو کاواک راجد می کنیم و حساسیت هر کدام را جداگانه بررسی می کنیم. با توجه به رابطه (۲) مقدار حساسیت ۱۴/۲ pm/C برای سیلیکا و مقدار حساسیت ۰/۵۴ pm/C برای هوا انتظار می رود که منجر به حساسیت ۱۳/۷ pm/C می شود. با رسم نمودار شیف طول موجی حسگر بر حسب دما برای کاواک اول حساسیت ۱۳ pm/C و کاواک بزرگتر حساسیت ۹/۸ pm/C بدست آمده است. (شکل ۴)

به معادلات فرنل ضرایب بازتاب از هر سه سطح ( $R_1$  و  $R_2$  و  $R_3$ ) است که به دلیل کوچک بودن ضریب بازتاب فقط بازتاب مرتبه اول را در نظر می گیریم و از بازتاب های مرتبه بالاتر چشم پوشی می کنیم. تغییرات دمایی محیط اطراف حسگر از طریق تغییر ضریب شکست و تغییر طول کاواک بر روی طیف طول موج اثر می گذارد که این میزان وابسته به ضریب ترمو اپتیک و ضریب انبساط دمایی است. رابطه (۲) شیف طول موجی بر حسب تغییرات دمایی را بیان می کند. برای سیلیکا ضریب انبساط دمایی  $K^{-1} \times 10^{-6}$  می باشد. و ضریب ترمو اپتیک  $K^{-1} \times 10^{-6}$  می باشد. اثر تغییر ضریب شکست بر اثر دما بیشتر از اثر انبساط دمایی است. برای هوا ضریب انبساط دمایی  $K^{-1} \times 10^{-6}$  و ضریب ترمو اپتیک  $K^{-1} \times 10^{-6}$  می باشد [7]

$$\Delta\lambda_0 = \lambda_0 (\alpha_{TO} + \alpha_{TE}) \Delta T \quad (2)$$

### ساخت حسگر

پدیده سوختگی در فیبرنوری برای لیزرهای توان بالاتر از 1W اتفاق می افتد که بر اثر خم شدگی فیبر یا کثیف بودن سر اتصالگرفیبر، نور از فیبر خارج می شود و باعث افزایش دمای نقطه ای تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد می شود. پلاسمای ایجاد شده منجر به تبخیر مغزی فیبر می شود و با سرعت چند متر بر ثانیه به سمت منبع حرکت می کند در نهایت مغزی فیبر دچار آسیب می شود و حباب های تناوبی بسته به میزان توان اولیه با فاصله های ۱۲ تا ۱۶ μm در بازه توان اولیه ۲ تا ۳ وات تشکیل می شود. [9,8] در ساختار حسگر از فیبر سوخته و فیبر تک مد استفاده می کنیم. با دستگاه جوش فیبر نوری یک فیبر تک مد را با فیبر سوخته جوش می دهیم که در آن حباب ها با هم تشکیل کاواکی با طول ۸۲ μm بیشترین عرض ۸۰ μm می -

شده درون مغزی فیبر می‌باشد که در ادامه با فیلتر کردن طیف و تحلیل دو کاواک به طور جداگانه به حساسیت های  $13 \text{ pm/C}$  و  $9/8 \text{ pm/C}$  در بازه  $60$  تا  $90$  درجه سانتی گراد دست یافتیم. کاواک دوم حساسیت کمتری نسبت به کاواک داخلی اول دارد و برای اندازه گیری همزمان می‌توان از کاواک دوم به دلیل حساسیت کمتر برای اندازه گیری پارامترهایی همچون ضریب شکست و فشار استفاده کرد.

### مرجع ها:

[1] Arregui, Francisco J. "Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber Bragg grating." *IEEE Sensors Journal* 2.5 (2002): 482-487.

[2] Li, Enbang, Xiaolin Wang, and Chao Zhang. "Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes." *Applied physics letters* 89.9 (2006): 091119.

[3] Frazão, O., et al. "Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip." *Optics letters* 34.16 (2009): 2474-2476.

[4] Gong, Yuan, et al. "Fiber-optic Fabry-Perot sensor based on periodic focusing effect of graded-index multimode fibers." *IEEE Photonics Technology Letters* 22.23 (2010): 1708-1710.

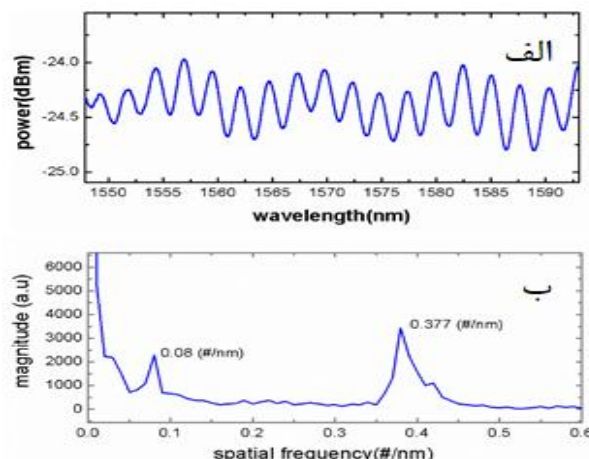
[5] Domingues, M. F. "Enhanced sensitivity high temperature optical fiber FPI sensor created with the catastrophic fuse effect." *Microwave and Optical Technology Letters* 57.4 (2015): 972-974.

[6] Rong, Qiangzhou. "A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer." *Journal of optics* 14.4 (2012): 045002.

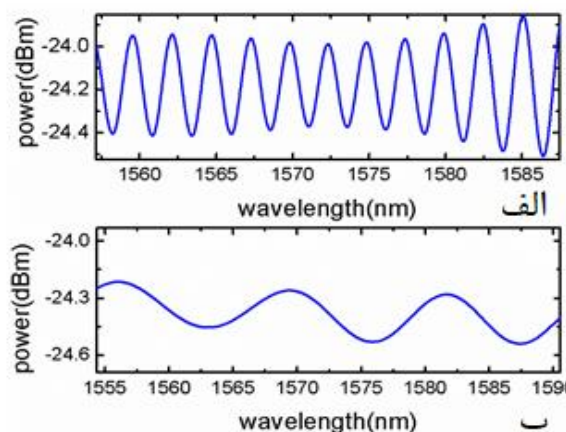
[7] André, Ricardo M "Simultaneous measurement of temperature and refractive index using focused ion beam milled Fabry-Perot cavities in optical fiber micro-tips." *Optics Express* 24.13 (2016): 14053-14065.

[8] Todoroki, Shin-ichi. "Origin of periodic void formation during fiber fuse." *Optics Express* 13.17 (2005): 6381-6389.

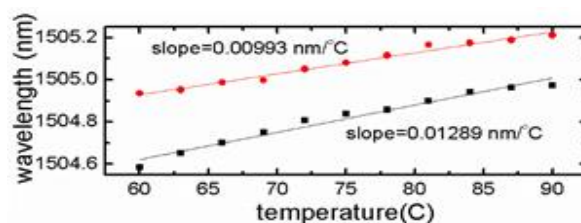
[9] Antunes, Paulo FC, et al. "Optical fiber microcavity strain sensors produced by the catastrophic fuse effect." *IEEE Photonics Technology Letters* 26.1 (2014): 78-81.



شکل ۳ (الف) طیف طول موج حسگر (ب) FFT طیف طول موج



شکل ۴ (الف) کاواک  $370 \mu\text{m}$  (ب) کاواک  $80 \mu\text{m}$  اعمال فیلتر میان گذر برای جدا کردن طیف طول موج دو کاواک



شکل ۵) نمودار شیفت طول موج بر حسب تغییر دما. داده های قرمز مربوط به کاواک دوم و دارای حساسیت  $9.8 \text{ pm/C}$  داده های مشکی مربوط به کاواک اول با حساسیت  $13 \text{ pm/C}$  است

### نتیجه گیری

در این مقاله روش جدید ساخت حسگر کاواک فابری\_پروهیبریدی بررسی شد. اساس کار این حسگر میکرو کاواک که با استفاده از فیبر سوخته ساخته