



اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبرنوری - ۶ آبان ۱۴۰۰

ICOFS 2021

پژوهشکده لیزر و پلاسمای
۱st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors
October 28, 2021



ساخت حسگر کرنش فابری پرو با استفاده از اثر ورنیه

علی رجبی فیروزآباد^{۱*}, امید رضا رنجبر نائینی^۲, مهدی میرزاچی^۲, حمید لطیفی^{۲,۱}

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش یک حسگر فیبرنوری به کمک دو تداخل سنج فابری پرو موazی ساخته شده است که به کمک آنها می‌توان کرنش را با حساسیت به مراتب بیشتر از یک تک حسگر فیبر نوری اندازه‌گیری نمود. دو تداخل سنج فابری پرو از ترکیب فیبرهای توخالی بین دو فیبر تک مد ساخته شده‌اند. یکی از این تداخل سنج‌ها به عنوان تداخل سنج مرجع و دیگری به عنوان تداخل سنج حسگری در نظر گرفته می‌شود. همچنین جداسازی و موazی کردن دو تداخل سنج به کمک یک کوپلر ۵۰ در ۵۰ صورت گرفته است. به کمک اثر ورنیه حساسیت ($\mu\text{e}/\text{pm}$) ۱۲,۲۳ در بازه دینامیکی ۰ تا ۴۰۰۰ یک کوپلر استرین حاصل گردیده است. این میزان حساسیت تقریباً ۱۳ برابر بزرگتر نسبت به حالت تک حسگر فابری پرو می‌باشد. با توجه به اینکه همراه با اندازه‌گیری کرنش نیاز به حسگری دما و یا کاهش اثرات آن بر طیف حسگر می‌باشد، بدین منظور از اثر ورنیه غیرعادی استفاده شده است. به موجب اثر ورنیه تغییرات دمایی در بازه ۴۰ تا ۷۵ درجه سانتی گراد حدود ۸ نانومتر تغییرات طول موجی اتفاق می‌افتد در حالی که به کمک اثر ورنیه غیرعادی این تغییرات از ۸ نانومتر به حدود ۴۰ پیکومتر تقلیل پیدا می‌کند.

کلید واژگان: تداخل سنج فابری پرو، حسگر فیبر نوری، اثر ورنیه، اثر ورنیه غیرعادی، حسگر کرنش

Fabrication of optical fiber Fabry-Perot strain sensor based on the Vernier effect

Ali Rajabi Firoozabad¹, Omid Reza Ranjbar Naeini², Mahdi Mirzaei², Hamid Latifi^{1,2}

1 Dept. of Physics, Faculty of Basic Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Iran.

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

Abstract: In this study, a pair of Fabry-Perot (FP) interferometers were used to construct an optical fiber sensor more sensitive than a single optical FP fiber sensor. In order to construct these interferometers, hollow-core fibers were combined and put between a pair of single-mode fibers. In the case of these interferometers, one was used as a reference while the other one was utilized as a sensing interferometer. Sensors integration was accomplished by a 50/50 coupler. We obtained 12.23 ($\mu\text{e}/\text{pm}$) sensitivity within the dynamic ranges 0-4000 μe , which are approximately 13 times greater than a single optical fiber FP sensor. Since there is a need for temperature compensation in the field of strain measurement, the complex optical Vernier effect has been used in the temperature range of 40-75°C, resulting in wavelength variations of 40pm

Keywords: Fabry-Perot interferometer, optical fiber sensor Vernier effect, complex Vernier effect, strain sensor

*a.rajabifiroozabad@mail.sbu.ac.ir

۱- مقدمه

حسگرهای فیبرنوری معمولاً بر پایه تداخل سنجی عمل میکنند . یکی از تداخل سنج های مرسوم در این نوع حسگرها تداخل سنج فابری پرو می باشد. برای ساخت تداخل سنج فابری پرو با استفاده از فیبرنوری می توان یک فیبر توالی را بین دو فیبر تک مد قرار داد. مقداری از نور ورودی (حدود ۴ درصد) به علت تعییر ضریب شکست در محل اتصال دو فیبر به داخل کاواک بازتاب می شود [1]. همین اتفاق در محل اتصال دوم نیز روی می دهد. دو پرتو بازتابی به علت اختلاف راه نوری ایجاد شده درون فیبر توالی با یکدیگر تداخل و طیف تداخلی را ایجاد می کنند. می توان از کمینه و بیشینه های این طیف تداخلی برای حسگری استفاده نمود. یکی از چالش های بزرگ در مسیر ساخت این نوع حسگر، افزایش حساسیت حسگر نسبت به پارامترها (کرنش) است. یک روش نوین برای حل این چالش استفاده از اثر ورنیه می باشد. برای ایجاد اثر ورنیه نیاز به دو مقیاس نزدیک به هم است. در این پژوهش از دو کاواک فابری پرو با طول کاواک های نزدیک به هم ولی متفاوت استفاده شده است . یکی از کاواک ها به عنوان کاواک مرجع در نظر گرفته می شود و از پارامترهای محیطی ایزوله می شود. کاواک دوم که کاواک حسگری نامیده می شود در معرض عوامل حسگری محیطی قرار داده می شود [2]. برای ایجاد اثر ورنیه و ایزوله کردن یکی از کاواک ها از کوپلر تقسیم می شود. این امر هم ایزوله کردن یکی از کاواک ها را ساده تر می کند و هم نمایانی طیف نهایی را افزایش می دهد [3].

۲- تئوری و انجام آزمایش

بعد از تقسیم شدت نور ورودی بین دو باروی کوپلر، نور از دو سطح کاواک بازتاب می شود در نتیجه می توان چهار میدان الکتریکی بازتابی از چهار سطح دو کاواک فابری پرو را در نظر گرفت و شدت نهایی را از آن ها به دست آورد. شدت بازتابی کل از این چهار میدان الکتریکی به صورت رابطه ۱ می باشد [2].

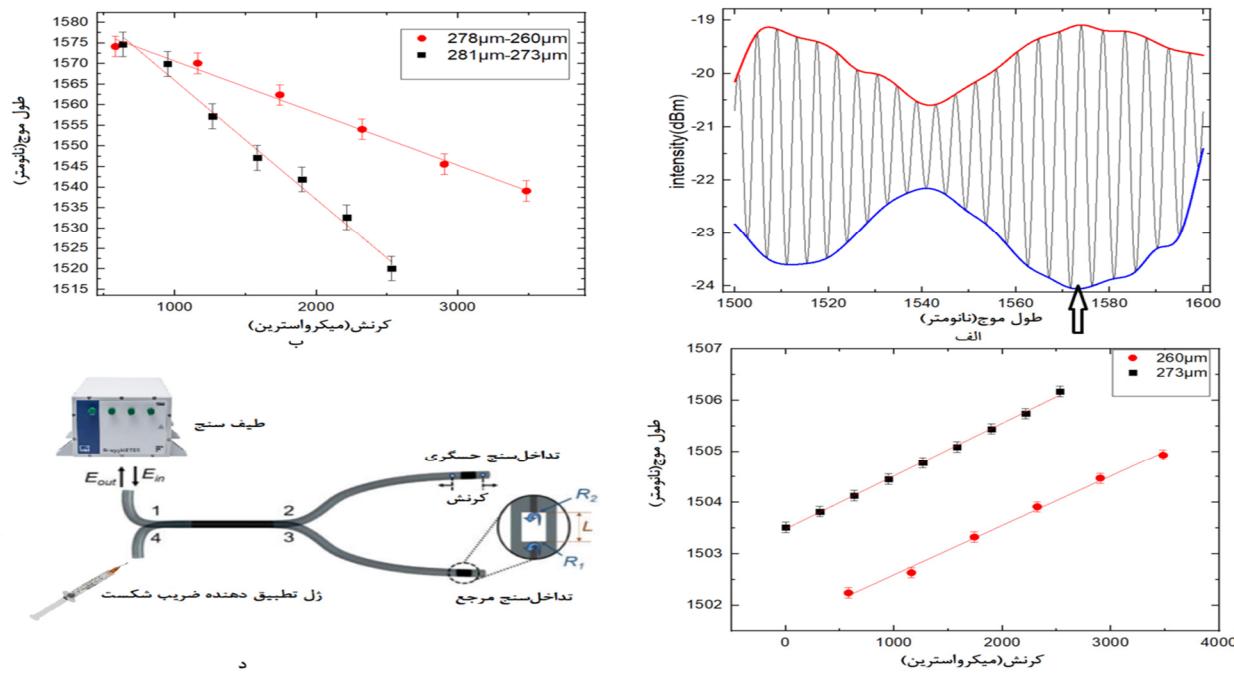
$$I_{out} = I_0 - 2AB \left[\cos\left(\frac{4\pi n_1 L_1}{\lambda}\right) + \cos\left(\frac{4\pi n_2 L_2}{\lambda}\right) \right] + B^2 \cos\left[4\pi\left(\frac{n_1 L_1 - n_2 L_2}{\lambda}\right)\right] \quad (1)$$

که در آن $A = \sqrt{R_1}$ ، $I_0 = 2A^2 + B^2$ ، $B = (1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}$ ، A_1 اتلاف عبوری از سطح n_1 ، n_2 به ترتیب ضریب شکست داخلی کاواک دوم و اول است. هر دو ضریب شکست هوا در نظر گرفته می شود، L_1 ، L_2 به ترتیب طول کاواک های دوم و اول است. λ طول موج ورودی به داخل کاواک ها می باشد. بخش اول و دوم رابطه همان قسمت آشنا در رابطه طیف تداخلی تک کاواک فابری پرو می باشد و بخش سوم قسمت مربوط به اثر ورنیه است که در واقع مربوط به پوش طیف دریافتی می باشد. اکنون اگر از کمینه و بیشینه های این بخش برای حسگری استفاده کنیم و آن را با حسگری به کمک کمینه و بیشینه های طیف یک تک کاواک مقایسه کنیم به رابطه ۲ می رسیم [3].

$$S_{envelope} = S_{sensor} * \frac{n_{sensorLsensor}}{n_{sensorLsensor} - n_{referenceLreference}} \quad (2)$$

با توجه به نزدیک بودن طول دو کاواک فابری پرو به هم، باعث افزایش میزان حسگری نسبت به تک کاواک می گردد. برای ساخت کاواک فابری پرو از یک فیبر توالی با قطر داخلی ۴۵ میکرومتر و قطر خارجی ۱۲۵ میکرومتر استفاده شده است که بین دو فیبر تک مد قرار می گیرد. ابتدا کاواک ها به طول ۲۶۰ و ۲۷۸ میکرومتر ساخته شده اند و کاواک به طول ۲۷۸ میکرومتر به عنوان کاواک مرجع انتخاب شده است. طیف خروجی بعد از اعمال فیلتر پایین گذر به صورت شکل ۱ قسمت (الف) می باشد. شکل ۱ قسمت (ب) و (ج) به ترتیب تغییرات

طول موجی بر حسب کرنش را برای حالت ورنیه و حالت تک کاوک نشان می‌دهند که در حالت تک کاوک حساسیت $(\frac{\text{pm}}{\mu\text{e}})^{0.9}$ با حدپایین اندازه‌گیری μe^{55} و در حالت اثر ورنیه $(\frac{\text{pm}}{\mu\text{e}})^{12.23}$ با حد پایین اندازه‌گیری μe^{80} به دست آمده اند. در مرحله بعدی کاوک‌ها به طول ۲۷۳ و ۲۸۱ میکرومتر ساخته شده‌اند که کاوک به طول ۲۷۳ به عنوان کاوک حسگری انتخاب شد و حساسیت‌ها در حالت تک حسگر و در حالت ورنیه به ترتیب $(\frac{\text{pm}}{\mu\text{e}})^{1.09}$ با حد پایین اندازه‌گیری μe^{45} و $(\frac{\text{pm}}{\mu\text{e}})^{27.76}$ با حد پایین اندازه‌گیری μe^{54} به دست آمدند.



شکل ۱- طیف خروجی بعد از اعمال فیلتر پایین گذر ترکیب کاوک‌های ۲۷۸ و ۲۶۰ میکرومتر، کمینه دوم پوش پایینی برای حسگری اثر ورنیه انتخاب شده است (الف) نمودار تغییرات طول موجی بر حسب کرنش حاصل از اثر ورنیه (ب) نمودار تغییرات طول موجی بر حسب کرنش اعمالی برای حسگرهای فابری-پرو به طول کاوک ۲۶۰ و ۲۷۳ میکرومتر (ج) شماتیک کلی استفاده شده در آزمایش (د) [2]

اگر هر دو کاوک تحت تاثیر پارامترهای محیطی قرار بگیرند، حساسیت نهایی به صورت رابطه ۳ در نظر گرفته می‌شود [3]

$$S_{envelope} = \frac{n_1 L_1}{n_1 L_1 - n_2 L_2} S_1 - \frac{n_2 L_2}{n_1 L_1 - n_2 L_2} S_2 \quad (3)$$

که در آن S_1 حساسیت تک حسگر اول و S_2 حساسیت تک حسگر دوم می‌باشد، این اثر را ورنیه غیر عادی مینامند. در صورتی حساسیت‌های هر دو حسگر نزدیک به هم باشد و پاسخ هر دو حسگر به پارامتر مد نظر یکی باشد اثراً تکرار یکدیگر را تقریباً حذف خواهد کرد. به منظور انجام تست دمایی کاوک به طول ۲۷۳ میکرومتر را در داخل کوره قرار داده و با کمک اثر ورنیه ایجاد شده از ترکیب این کاوک با کاوک ۲۸۱ میکرومتر تست دما انجام شد. با تغییرات دمایی از ۴۵ تا ۷۵ درجه سانتی گراد، تغییرات طول موجی ۸ نانومتر مشاهده شد در صورتی که با اعمال تغییرات دمایی بر هر دو کاوک این تغییرات طول موجی به حدود ۴۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد.

مراجع

1-Yuqiang YangOptik - International Journal for Light and Electron Optics 196 (2019) 163181

2-André D. Gomes Sensors 2019, 19(24), 5431

3-André D. Gomes Laser & Photonics Reviews (2021): 2000588