

مروری بر حسگرهای فیبر نوری مورد استفاده در صنایع الکترونیک، اینترنت اشیا، و شبکه‌های مخابراتی نسل جدید

فرامرز اسمعیلی سراجی^۱، محمد قنبری صباغ^۲ و داود رنجبر رفیع^۲

۱. گروه مخابرات نوری، پژوهشکده فناوری ارتباطات، تهران

۲. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

پست الکترونیکی: fseraji@itrc.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۸/۰۹/۲۶)

چکیده

حسگرهای فیبر نوری موجود در بازار برای اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی در صنایع مختلف مانند میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، جریان الکتریکی، درجه حرارت، فشار، شتاب، جریان مایعات و گازها و اندازه‌گیری سطح مایعات به کار گرفته می‌شوند. امروزه به دلیل کاربردهای روزافزون حسگرهای فیبر نوری، سازنده‌های بسیاری از ماشین آلات و سیستم‌های کنترل آمادگی خود را در به‌کارگیری این نوع حسگرها در فرآورده‌های تولیدی اعلام کرده‌اند. اهمیت روزافزون حسگرهای نوری، به ویژه در شبکه‌های حسگر بی‌سیم، در اینترنت اشیا، و شبکه‌های فیبر نوری، این نوع حسگرها را در طی دهه‌های گذشته تا به امروز مورد توجه و مطالعه گسترده‌ای قرار داده است. در این مقاله، مروری بر جنبه‌های فنی، ویژگی و کاربردهای حسگرهای فیبر نوری گزارش شده است. نتیجه‌های این گزارش می‌تواند برای طراح‌های این حسگرها در صنایع مختلف، مهندسان اجرایی مخابرات، و دانشجویان مقطع‌های کارشناسی، ارشد رشته‌های فیزیک و مهندسی مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: حسگرهای فیبر نوری، صنایع الکترونیک، اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی، شبکه‌های مخابراتی

۱. مقدمه

میدان مغناطیسی، ولتاژ مبتنی بر اثر فاراده، pH محلول شیمیایی، موج‌های صوتی، فشار، حرارت، چرخش اجسام پرنده (ژیروسکوپ)، آلودگی نفتی و هوا، در امور تشخیص و درمان پزشکی به طور مؤثر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طی سه دهه اخیر، کتاب‌های زیادی در خصوص حسگرهای (فیبر) نوری در زمینه‌های مختلف اندازه‌گیری به چاپ رسیده‌اند که مورد نیاز صنایع گوناگون و دانشگاه‌ها در سطوح مختلف

حضور اولیه حسگرهای فیبر نوری به‌عنوان دستگاه‌های اندازه‌گیری و کنترل در آن بخش از تجارت بیشتر محسوس است که عامل‌هایی از قبیل حساسیت، مقاومت در برابر محیط متخاصم، هزینه و غیره مد نظر باشد. انواع مختلف حسگرهای فیبر نوری در صنایع وجود دارند که برای اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی مانند جریان الکتریکی،

تحصیلی بوده‌اند [۱-۲۰].

شبکه‌های بی‌سیم فراگیر با پیشرفت انفجاری در صنایع الکترونیک، به واقعیت تبدیل شده‌اند. گوشی‌های هوشمند و دستگاه‌های بی‌سیم بیشتر در حال تبدیل شدن به یک ضرورت روزمره هستند، در حالی که در سال‌های گذشته به عنوان ابزار لوکس تلقی می‌شدند. در چند سال قبل، این پیشرفت‌ها موجب افزایش تعداد ارتباطات شد. بر اساس گزارش CISCO^۱، تعداد دستگاه‌های هوشمند متصل شده در شبکه‌های جهانی در سال ۲۰۱۵ به بیش از دو برابر جمعیت جهان رسیده و پیش‌بینی شده تا سال ۲۰۲۰ بیش از سه برابر شود [۲۱]. فراگیر شدن شبکه‌های بی‌سیم و فراوانی دستگاه‌های هوشمند منجر به ظهور «اینترنت اشیاء» (IoT) شده است. هدف اینترنت اشیاء اتصال «همه چیز» به یکدیگر است که از جمله می‌توان آگاهی از اقلام شخصی، حس کردن محیط زیست، برقراری ارتباط با یکدیگر و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه بدون دخالت انسان را نام برد.

کلیه جنبه‌های زندگی ما نظیر بیدار باش صبحگاهی، حمام آماده، قهوه آماده برای صبحانه، یک خودرو هوشمند آماده (به طور بالقوه خود-ران) برای انتقال به محل کار، و پرداختن به جزئیات کوچک شخصی، از جمله مواردی هستند که انتظار می‌رود تحت پوشش IoT قرار گیرند. علاوه بر این، کاربردهای IoT زمینه‌های شهر هوشمند، سیستم «حمل و نقل هوشمند»^۳، مسکن هوشمند، سلامت الکترونیکی، کشاورزی و غیره را دربر می‌گیرد که در آینده زمینه‌های دیگر نیز به آن اضافه خواهند شد [۲۲-۲۵].

با ظهور اینترنت اشیاء (IoT) (یا به عنوان «اینترنت همه چیز»^۴)، بیشتر دستگاه‌ها با هوشمندی بیشتر، بر اساس اطلاعات دریافتی از دستگاه‌های دیگر طراحی می‌شوند. این توسعه به چندین نوع حسگر فیبر نوری از جمله حسگرهای اطلاعات مربوط به محیط زیست اطراف، طراحی شده و برای اتصال آنها

نیاز است که فیبر نوری‌هایی در محیط‌های مختلف نصب شوند. از این رو، صنعت حسگر فیبر نوری مرکز توجه بسیاری از تلاش‌های محققین در سال‌های اخیر شده است.

با توجه به تعداد زیادی از حسگرهای فیبر نوری مورد نیاز در نسل آینده IoT، سیستم‌های حسگر باید ارزان باشند، و علاوه بر دقت، پاسخ لحظه‌ای و هزینه کم، از طراحی آسان و انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار باشند.

روش‌های حسگری فیبر نوری در حال حاضر به طور گسترده و معمول برای پایش پارامترهای فیزیکی نظیر تنش، دما، ضریب شکست، فشار، رطوبت، و غیره، پارامترهای سلامت، مثل ضربان قلب و فشار خون، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این مقاله، با توجه به اهمیت فنی حسگرهای فیبر نوری در صنایع مختلف و نقش مهم آنها در شبکه‌های اینترنت اشیاء و شهر هوشمند، حسگرهای آلودگی‌های نفتی، حسگرهای نوسان مبتنی بر مدوله‌سازی خارجی و داخلی، حسگرهای حرارت و موج‌های صوتی، حسگرهای سطح مایع، ژيروسکوپ‌های فیبرنوری (حسگر چرخش)، حسگرهای جریان الکتریکی، و حسگرهای فیبر نوری برای کمیت‌های فیزیکی مبتنی بر تشدیدگر حلقوی فیبر نوری مورد بررسی کیفی قرار گرفته‌اند. این مقاله برای علاقمندانی که جدیداً وارد حوزه حسگرهای فیبر نوری شده‌اند، می‌تواند نقطه آغازین برای فعالیت جدیدشان باشد.

۲. حسگرهای متداول فیبر نوری

دو نمونه از حسگرهای متداول با حساسیت بالا، حسگرهایی هستند که بر اساس اصول تداخل سنج ماخ-زندر [۲۶-۲۹] و تداخل سنج ساگاناک [۳۰-۳۳] ساخته می‌شوند که در صنایع حساس مانند هوانوردی و دریانوردی کاربرد مؤثری دارند و اغلب استفاده آنها در فرایندهای کنترل پارامترها بازدهی بالایی دارند.

یک کاربرد مهم حسگرهای فیبر نوری برای ساخت سنجه «کاوشگر»^۵ پزشکی است که در فناوری رو به رشد این صنعت نقش مهمی را ایفا می‌کند. این حسگرها دارای حجم کم و

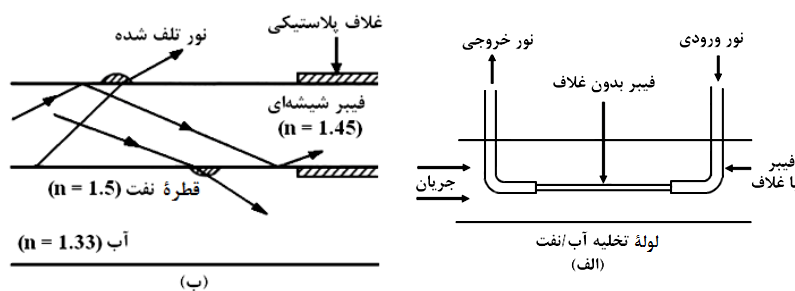
۱. یک شرکت چند ملیتی سازنده تجهیزات و ادوات پیشرفته سیستم‌ها و شبکه‌های مخابراتی، فناوری اطلاعات، و صنایع الکترونیک است. <http://www.cisco.com>

۲. Internet of Things: IoT Intelligent Transport Systems: ITS

۳. سیستم‌های حمل و نقل که در «شهر هوشمند» استفاده می‌شوند.

۴. Internet of Everything: IET

۵. Probe



شکل ۱. حسگرهای تشخیص آلودگی نفتی در آب.

دستگاه‌های مراقبتی و تجسسی نظامی و سیستم‌های نیروی دریایی بر اساس حسگرهای فیبر نوری خیلی حساس طراحی شده‌اند که از آن جمله می‌توان هیدروفون، مغناطیس‌سنج و ژيروسکوپ را نام برد [۴۶-۴۸].

در زمینه دورسنجی^۲ نوری مبتنی بر سیستم واحدی که بتواند در کارهایی نظیر کشتی‌رانی، آتش‌سوزی و کنترل خسارت، اندازه‌گیری آلودگی ناشی از دود، اندازه‌گیری فشار، کنترل موتور و کنترل تغییرات جوی مورد استفاده قرار گیرند، حسگرهای مناسبی ساخته شده‌اند. در شکل ۲، برخی از این حسگرها برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در یک کشتی نشان داده شده‌اند [۴۹].

۳. استفاده از مدوله‌سازی در عمل حسگری

به‌کارگیری مدوله‌سازی در عمل حسگری فیبر نوری عمده‌تأ به دو صورت انجام می‌پذیرد: یکی اثر گذاری بر پارامترهای فیبر و نهایتاً تغییر در پارامترهای نور منتشره در آن و دیگری اثرگذاری بر مشخصات نور که مستقل از پارامترهای فیبر است. اولی مدوله‌سازی داخلی و دومی مدوله‌سازی خارجی است. در هر دو حالت، عامل مدوله‌سازی کمیت‌های مورد نظر اندازه‌گیری هستند.

به عبارت دیگر، یک حسگر فیبر نوری قطعه‌ای از طول آن است که یا خود به عنوان عامل حس‌کننده عمل می‌کند که به طریقی نور منتشره در آن مدوله می‌شود یا صرفاً به عنوان محیط انتقال نور در ساختار حسگر استفاده می‌شود.

برای تأمین انرژی نور در حسگرهای فیبر نوری می‌توان از یک دیود نورگسیل یا یک دیود لیزری استفاده کرد که از انتهای

سازگار با بافت‌های زنده هستند و نیازی به سیم‌های الکتریکی ندارند. وجود و کاربرد این سنج‌های پزشکی در آینده، مثل اندوسکوپ^۱، در درمانگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها ضروری و غیر قابل اجتناب خواهد بود [۳۴-۳۸].

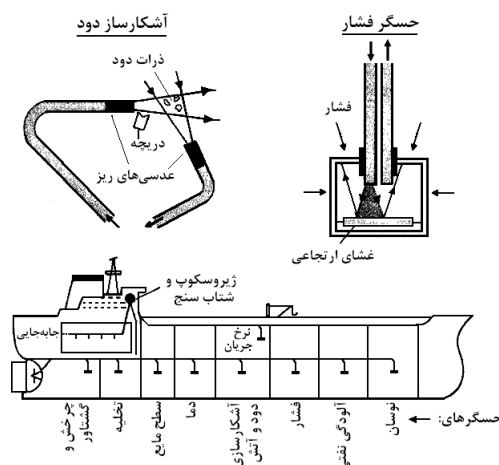
یکی دیگر از کاربردهای مهم، در سیستم‌های کنترل تمام-فیبری است که در آن چندین حسگر مختلف فیبر نوری از طریق یک شبکه فیبر نوری قادر خواهند بود سیگنال‌های خروجی خود را به یک رایانه مرکزی ارسال کنند. در این نوع سیستم‌های غیرفعال (پاسیو) دیگر نیازی به تبدیل سیگنال‌های نوری به سیگنال‌های الکتریکی نیست. هواپیماها، کشتی‌ها، نیروگاه‌ها و فرایندهای صنعتی و غیره خواستار این سیستم‌های کنترل تمام-فیبری هستند [۳۹-۴۳].

۱.۲. حسگر آلودگی‌های نفتی

اندازه‌گیری نشت نفت در دریاها و تشخیص بین آلودگی اجسام جامد و آلودگی نفتی در آب‌ها توسط حسگرهای فیبر نوری دقیق‌تر از دستگاه‌های موجود نوع دیگر است. در این نوع کاربرد، حسگرهای فیبر نوری مقدار پراکندگی نور ناشی از نفت موجود در آب را اندازه‌گیری می‌کنند. دو نوع حسگر برای تشخیص آلودگی نفتی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند [۴۴-۴۵]. این دو نوع حسگر فیبر نوری، بر اساس تغییر ضریب شکست مغزی فیبر عمل می‌کنند. تغییر ضریب شکست ناشی از آب یا قطر نفتی باعث اختلال در انتشار نور در فیبر می‌شود که تلفات نور را به دنبال دارد. آشکارسازی این تلفات می‌تواند معیاری برای وجود آلودگی و مایع محاط‌کننده فیبر باشد.

۲. Telemetry

۱. Endoscope



شکل ۲. حسگرهای موجود در یک کشتی برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف.

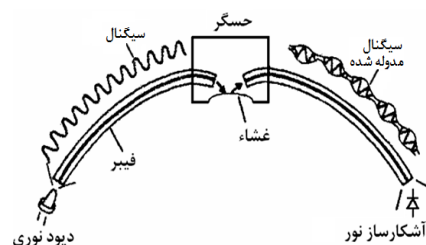
که در آن عمل مدوله‌سازی نور توسط یک غشاء انجام می‌شود که واسط بین دو قطعه فیبر نوری است [۵۲].

۲.۳. حسگری مبتنی بر مدوله‌سازی داخلی

در روش مدوله‌سازی داخلی، کمیت مورد نظر برای اندازه‌گیری، نوری که از داخل فیبر منتشر می‌شود را مدوله می‌کند. حسگرهای تابشی اولین حسگرهای فیبر نوری با مدوله‌سازی داخلی بودند. در سال ۱۹۷۸ میلادی، این نوع مدوله‌سازی در سیستم فضایی «ماهواره فناوری هوانوردی-۲» برای پرتاب به فضا تعبیه شده بود. حسگر مذکور شامل یک فیبر شیشه‌ای بود که وقتی در معرض تابش قرار می‌گرفت به طریق مشخص و حساب شده‌ای تلفات آن بالا می‌رفت؛ که ناشی از تغییر در ضریب شکست آن بود.

در شکل ۴ یک نوع دیگر حسگر فیبر نوری مبتنی بر مدوله‌سازی داخلی شدت نور نشان داده شده که در آن موج‌های صوتی دامنه نور منتشره در فیبر را مدوله می‌کنند و در خروجی، این نور مدوله شده، توسط یک آشکارساز دریافت می‌شود [۵۲ و ۵۳].

یکی دیگر از این نوع حسگر فیبر نوری، حسگر تلفات ریزخمشی است که در شکل ۵ نشان داده شده است. ریزخمش‌ها در فیبرهای نوری تغییر شکل عرضی کوچکی در مغزی فیبر هستند که باعث فرار نور در حال انتشار از آن



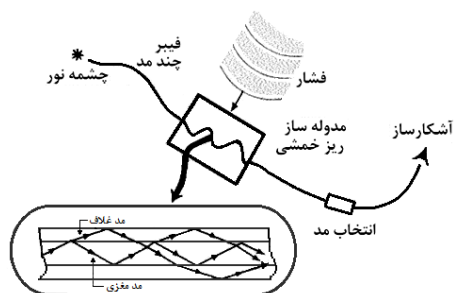
شکل ۳. حسگر فیبر نوری بر اساس مدوله‌سازی خارجی شدت نور.

ورودی فیبر، پرتو نور با یک زاویه معین وارد شده و در انتهای دیگر فیبر، نور توسط یک آشکارساز نوری دریافت می‌شود [۵۰-۵۳].

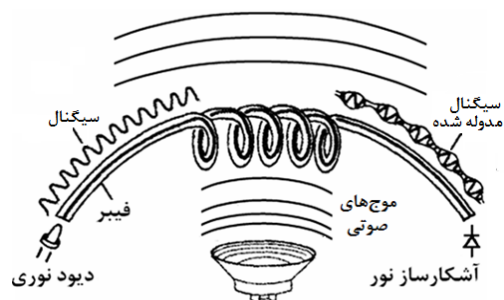
۱.۳. حسگری مبتنی بر مدوله‌سازی خارجی

یک دستگاه جدا از فیبر، که به برخی محرکه‌های خارجی حساس باشد (مثل یک عنصر و یا یک ساختار مکانیکی)، قادر است کار مدوله‌سازی خارجی روی نور منتشر شده از فیبر را انجام دهد. در این نوع حسگرها، فیبر نوری فقط به عنوان محیط انتقال نور استفاده می‌شود و مدوله‌سازی منحصر بر مشخصات نور اعمال می‌شود.

روش مدوله‌سازی خارجی برای اندازه‌گیری کمیت‌هایی مثل درجه حرارت، جریان برق، میدان مغناطیسی، آلودگی آب، جابه‌جایی مواد، مقدار تابش و چند کمیت دیگر، به کار گرفته می‌شود. در شکل ۳، یک حسگر فیبر نوری که بر اساس مدوله‌سازی خارجی در شدت نور کار می‌کند، نشان داده شده



شکل ۵. حسگر فیبر نوری مبتنی بر تلفات ریزخمش با مدوله سازی داخلی.



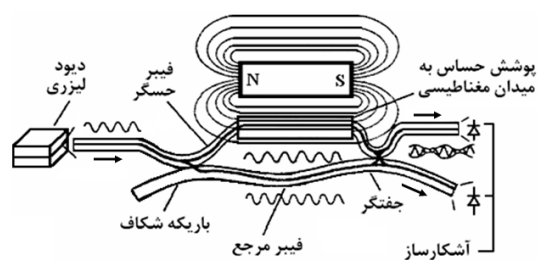
شکل ۴. حسگرهای فیبر نوری بر اساس مدوله سازی داخلی شدت نور.

نشان دهنده شدت میدان مورد نظر در اندازه گیری است [۵۷] و [۵۸].

فیبر حس کننده در این نوع حسگرهای به کار برده شده، مغزی با عنصر یا ماده ای دارد که با ضخامت متناسب است، و وقتی در معرض میدان مورد نظر قرار می گیرد با تأثیرپذیری از آن، کشیده یا فشرده می شود. این عمل با اعمال فشار در فیبر به نوبه خود طول فیبر را تغییر می دهد که در نتیجه ضریب شکست فیبر نیز تغییر می کند. به دنبال این تغییر در فیبر، مشخصات نور منتشر شده در فیبر هم تغییر می کند که متناسب با میدان تحت اندازه گیری است.

یک قسم دیگر حسگر فیبر نوری، تداخل سنج فیبری ساگناک^۱ است که در شکل ۷ نشان داده شده که از یک «حلقه ساگناک» فیبر نوری تشکیل شده است. پرتو نور از منبع، توسط یک جفتگر نوری با نسبتی تقسیم و در دو جهت مخالف هم در حلقه منتشر می شوند. اگر حلقه فیبر در یک صفحه در جهت یکی از دو پرتو بچرخد، بر اساس اثر ساگناک، اختلاف فازی بین دو پرتو نور منتشره در حلقه به وجود می آید. این تفاوت فاز دو پرتو نور متقابل به هم می تواند مقیاسی برای سرعت زاویه ای حلقه فیبر باشد که همان اساس کار دستگاه ژيروسکوپ است.

به طور کلی، بررسی های تحقیقاتی نشان می دهند حسگرهایی که در آنها فیبرهای چند مد و دیویدهای نورگسیل به کار رفته اند (مانند شکل های ۴ و ۵) در مقایسه با حسگرها با فیبرهای تک مد و چشمه لیزری (مانند شکل های ۶ و ۷)، به دلیل هزینه کمتر این ادوات، بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند.



شکل ۶. حسگر فیبر نوری مبتنی بر تداخل سنج ماخ-زندر فیبری.

می شوند که در مخابرات فیبر نوری یک مشکل به حساب می آید [۵۴].

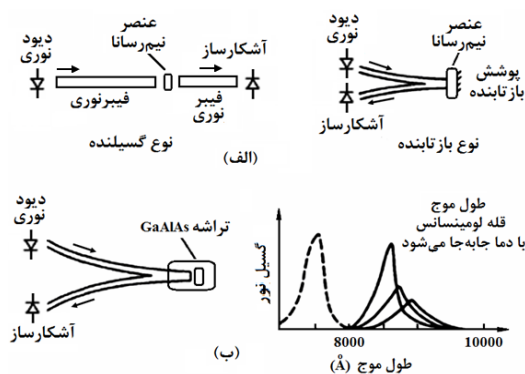
در این نوع حسگرها، تغییر شکل دهنده های مکانیکی به کار برده می شوند تا ریز-خمشی های تعمودی در فیبر ایجاد کنند. براساس ماهیت طرح و مواد تغییر شکل دهنده های ریز خمشی، امکان آن دارد که حسگرهایی از قبیل صوتی، مغناطیسی، الکتریکی، حرارتی یا شتاب ساخته شوند. این نوع حسگر ساخته شده برای اندازه گیری جابه جایی خیلی پایین توانست مقدار ۲۸/۲ نانومتر را اندازه گیری کند [۵۵ و ۵۶].

۴. حسگر تداخل سنج ماخ-زندر فیبری

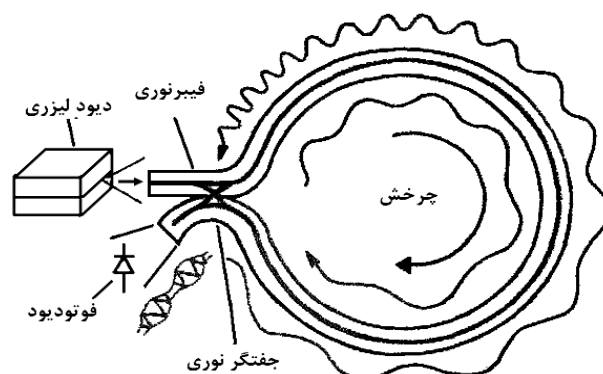
حسگر تداخل سنج ماخ-زندر فیبری هم در زمرة حسگرهای نوع مدوله سازی داخلی است که بر اساس تغییر فاز نور منتشر شده در فیبر تک مد عمل می کند. در این حسگر فیبری مطابق شکل ۶، فاز نور در فیبر حس کننده با فاز نور در فیبر مرجع مقایسه می شود.

در این حسگر، فیبر حس کننده معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرد که باید اندازه گیری شود. مقدار تغییری که در فاز نور فیبر حس کننده نسبت به فاز نور فیبر مرجع به وجود می آید،

۱. Sagnac fiber interferometer



شکل ۸. انواع حسگرهای حرارت فیبرنوری.



شکل ۷. حسگر فیبر نوری با استفاده از تداخل سنج ساگناک فیبری.

۵. حسگرهای حرارت فیبر نوری

حسگرهای فیبر نوری برای اندازه‌گیری حرارت، سال‌ها است که به بازار صنایع مختلف راه یافته‌اند. طرح‌های اولیه آنها قادرند انرژی فروسرخ را که از یک فرایند حرارتی زیاد ناشی شده به یک آشکارساز منتقل کنند. نمونه‌ای از آنها می‌تواند ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کند. نمونه‌هایی از این نوع حسگر در شکل ۸ نشان داده شده‌اند که در آنها عنصر حسگر یک نیم‌رسانا است [۵۹ و ۶۰].

در شکل ۸ الف، انواع حسگرهای حرارت نمایش داده شده‌اند که در آنها فیبر نوری به عنوان محیط انتقال نور عمل می‌کند. حسگرهای حرارت فیبر نوری را، به علت مصونیت در مقابل نوفه الکتریکی و داشتن حجم کم، می‌توان در سیم پیچ‌های موتور برای کنترل حرارت به کار برد. طوری می‌توان این حسگرها را طراحی کرد که قادر به اندازه‌گیری نوسان‌های حرارتی با بسامد بالاتر از بسامد قابل اندازه‌گیری با روش مشابه دیگر باشند [۶۰].

حسگر حرارت فیبر نوری از نوع تداخل سنج مایخ-زن‌ندر فیبری حساسیت زیادی دارد تا جایی که قادر است یک میلیونیم درجه سانتی‌گراد را اندازه‌گیری کند.

۶. حسگرهای موج‌های صوتی (هیدروفون)

هیدروفون یکی از حسگرهایی است که در کاربردهای نظامی مورد توجه قرار گرفته و از حساسیت و دقت بالایی برخوردار است. حسگرهای فیبر نوری موج‌های صوتی زیر آبی (هیدروفون) ساخته شده قادرند موج‌های صوتی در زیر آب را آشکارسازی

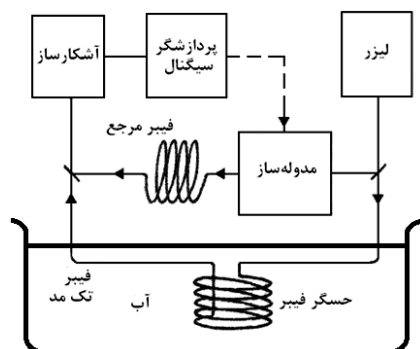
کنند که در مقایسه با نوع پیزوسرامیکی از مزیت‌های بیشتری برخوردارند. این نوع حسگرها دارای پاسخ بسامد پهنی هستند و به تغییرات حرارت و فشار ساکن آب حساس نیستند. در شکل‌های ۹ و ۱۰ دو نوع هیدروفون به ترتیب نوع ریزخمش و نوع تداخل سنجی نشان داده شده‌اند [۶۱-۶۳].

به عنوان مثال، در هیدروفون در شکل ۹، فشار صوتی P باعث ایجاد ریز-خمش در فیبر می‌شود و بدین ترتیب بر انتشار نور اثر می‌گذارد. در شکل ۱۰، هیدروفون از تداخل سنجی نور فیبر مرجع و نور حسگر استفاده می‌کند که در آن نور فیبر مرجع مدوله می‌شود و با نور فیبر حس‌کننده با فاز متفاوت در آشکارساز تداخل می‌کند.

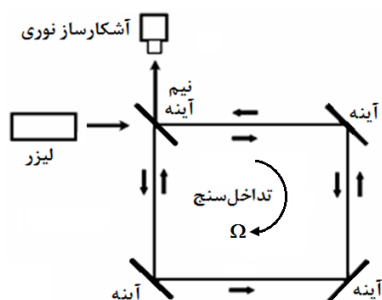
در شکل ۱۱، بر اساس یک حسگر فشارسنج فیبرنوری، یک میکروفون فیبری نشان داده شده که در آن نور در یک فیبر چند مد با یک روش غیر تداخل سنجی مدوله می‌شود. فشار موج صوتی باعث می‌شود که انتهای فیبر فرستنده نور نسبت به فیبر گیرنده نوسان کند و بدین ترتیب نور ورودی از فیبر فرستنده به فیبر گیرنده مدوله شود. بدین ترتیب، دامنه مدوله‌سازی نور می‌تواند معیاری برای شدت موج صوتی باشد. این حسگر را می‌توان از نوع حسگری دسته‌بندی کرد که بر اساس مدوله‌سازی خارجی کار می‌کند [۶۱-۶۳].

۷. ژيروسکوپ‌های فیبرنوری

بسیاری از ژيروسکوپ‌هایی که قبلاً مورد استفاده قرار می‌گرفتند ابزارهای مکانیکی بودند که بر اساس چرخش جرم کار



شکل ۱۰. حسگر هیدروفون فیبر نوری از نوع تداخل سنجی برای دریافت موج‌های صوتی در زیر آب.



شکل ۱۲. اساس تداخل سنج ساگناک شامل یک لیزر، یک آشکارساز نوری، سه آینه کامل، و یک نیم آینه است.

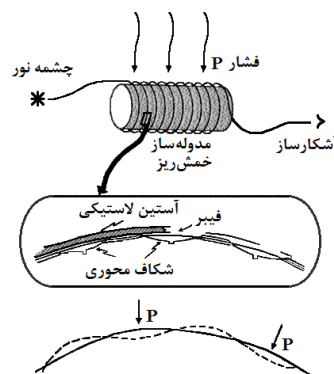
خواهد بود. یکی از این حالت‌ها که مورد توجه قرار گرفته است همان اثر ساگناک است.

همان طور که در رابطه با شکل ۷ توصیف شده، اثر ساگناک را می‌توان به طور ساده به نمایش گذاشت. اگر نور در جهت مخالف چرخش Ω حلقه ساگناک منتشر شود، به نظر ناظر در یک نقطه مرجع مسافت کوتاه‌تری را طی می‌کند، و در مقابل اگر حرکت نور در جهت موافق چرخش Ω باشد، مسافت طی شده طولانی‌تر است. بنابراین، در هر دو حالت دو پرتوی که به آشکار می‌رسند مسافت متفاوتی را طی می‌کنند که نسبت به یکدیگر هم‌فاز نیستند.

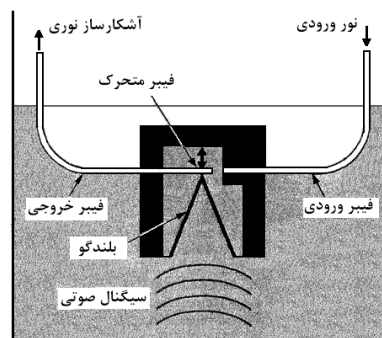
با استفاده از این اثر می‌توان اختلاف فاز دو پرتو را به صورت زیر بیان کرد [۷۰]:

$$\Delta\phi = \pi \frac{A\Omega}{c\lambda}, \quad (1)$$

که در آن A مساحت محصور کننده پرتوهای نور، Ω نرخ چرخش اعمال شده (رادیان بر ثانیه)، c و λ به ترتیب سرعت



شکل ۹. هیدروفون فیبر نوری برای دریافت موج‌های صوتی در زیر آب از نوع ریزخمشی.

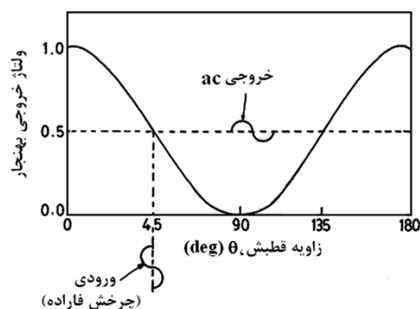


شکل ۱۱. حسگر فشارسنج فیبرنوری به عنوان یک میکروفون فیبری.

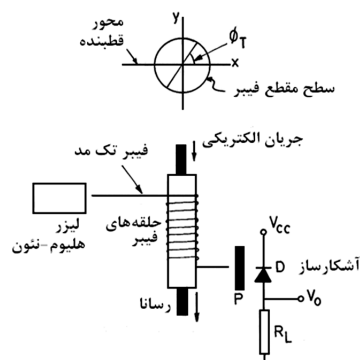
می‌کردند، اما در سه دهه اخیر، روش‌های نوری برای اندازه‌گیری چرخش مورد توجه محققان قرار گرفته و دستگاه‌های ژيروسکوپ فیبر نوری به مرحله ساخت رسیده‌اند. این روش‌ها از مزیت‌های بسیاری از نظر هزینه، قابلیت اطمینان و عملکرد بالایی برخوردار هستند [۶۴-۶۹].

همان طور که گفته شده، اندازه‌گیری چرخش به روش نوری بر مبنای اثر «ساگناک» استوار است که ابتدا در سال ۱۹۱۲ با یک تداخل سنج ساگناک مطابق شکل ۱۲ نمایش داده شد. در ورودی تداخل سنج، نور توسط یک نیم آینه (شکافنده نور) با یک نسبت معین در دو جهت هدایت و منتشر می‌شود که پس از طی مسیرهای متقابل در داخل تداخل سنج، این دو پرتو در آشکارساز نوری با هم تداخل می‌کنند.

اگر دو مسیر طی شده توسط دو پرتو یکسان باقی بماند، این دو پرتو برگشتی در آشکارساز تداخل سازنده خواهند داشت. در عمل، حالت‌های مختلفی وجود دارند که در آنها تغییر دادن طول مسیرهای طی شده توسط پرتوهای نور میسر



شکل ۱۴. تغییرات تناوبی خروجی حسگر جریان الکتریکی بر حسب زاویه چرخش قطبش θ .



شکل ۱۳. حسگر فیبرنوری برای اندازه‌گیری جریان الکتریکی.

که در آن N تعداد حلقه در پیچۀ فیبر (در معرض میدان)، μ_r و μ_0 به ترتیب نفوذپذیری خلأ و فیبر، V ثابت وردت^۱ و i جریان الکتریکی تحت آزمون است.

در شکل ۱۴، تغییرات تناوبی خروجی حسگر بر حسب زاویه چرخش قطبش θ نشان داده شده که نسبت به محور عبوری تحلیلگر قطبش (P) (شکل ۱۳) به دست آمده است. برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی کمتر از ۰/۱ نانو تسلا، حسگر تداخل سنج فیبری ماخ-زندر با پوشش عنصر ماگنتواستریکتیو^۲ مناسب‌تر است (شکل ۶). فشار اعمال شده به پوشش فیبر به وسیله میدان مغناطیسی به فیبر منتقل شده و باعث تغییر مشخصات آن می‌شود [۷۰]. آهن، کبالت، نیکل، و شیشه متالیک از عناصر ماگنتواستریکتیو هستند.

آشکارسازی نور در این نوع حسگرها به محققین این فرصت را داد که بتوانند به طور دقیق میدان‌های مغناطیسی را که نرخ تغییر بسامدشان از چندین کیلوهرتز تا ۱۰ هرتز است، اندازه‌گیری کنند.

با اعمال فرایند بازخورد می‌توان طوری مدارهای حسگرهای تداخل سنجی را در آزمایشگاه پایدار ساخت که انحراف از پایداری در اندازه‌گیری بعد از چندین روز کمتر از یک در صد باشد. با این روش، شدت مغناطیسی ساکن تا 10^{-10} تسلا اندازه‌گیری شده است. میدان‌هایی هم تا شدت 10^{-14} تسلا در دمای اتاق قابل اندازه‌گیری بوده است.

نور و طول موج نور در خلأ هستند.

اگر حلقه فیبرنوری با طول L و شعاع R باشد، اختلاف فاز دو پرتو برابر است با:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi LR\Omega}{c\lambda} \quad (2)$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که نرخ چرخش Ω یک تابع خطی نسبت به اختلاف فاز است که توسط اثر ساگاناک بین دو پرتو ایجاد می‌شود. بنابراین، در عمل با اندازه‌گیری اختلاف فاز $\Delta\phi$ ، نرخ چرخش قابل اندازه‌گیری و کنترل خواهد شد.

۸ حسگرهای جریان الکتریکی فیبر نوری

حسگرهای فیبرنوری که بر اساس «اثر فاراده» کار می‌کنند در اندازه‌گیری جریان الکتریکی و میدان‌های مغناطیسی با شدت بالا با تراکم شار بیش از 10^{-4} تسلا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۳ و ۵۸]. در این حسگرهای فیبرنوری زاویه قطبش نور متناسب با شدت میدان می‌چرخد. در شکل ۱۳ یک نوع حسگر فیبر نوری جریان الکتریکی نشان داده شده که بر اساس اثر فاراده کار می‌کند. این حسگر از یک منبع لیزر، پیچۀ فیبر نوری بر روی رسانای الکتریکی، یک آشکارساز نور، و یک صفحه تحلیلگر قطبش (پولاروید) تشکیل شده و ϕ_T زاویه قطبش نور خروجی از لیزر است که وارد فیبر می‌شود.

چرخش زاویه قطبش نور منتشره در فیبر توسط اثر فاراده با رابطه زیر تعیین می‌شود [۷۰]:

$$\theta = N \mu_0 \mu_r V i, \quad (3)$$

۱. Verdet constant

۲. Magnetostrictive

در گزارشی یک حسگر فشار مبتنی بر تشدیدگر حلقوی برای اندازه‌گیری صفر تا ۶۰ kPa طراحی و ساخته شده که حساسیت آن به ترتیب ۱/۴۷ pm/kPa و ۱/۳۶ kPa بوده است [۹۰]. حسگر دیگری با استفاده از نانو فیبر در حلقه تشدید برای اندازه‌گیری ضریب شکست آزمایش شده که دارای حساسیتی به بزرگی ۷۰۰ nm/RIU و تفکیک‌پذیری به کوچکی 10^{-7} بوده است [۹۱].

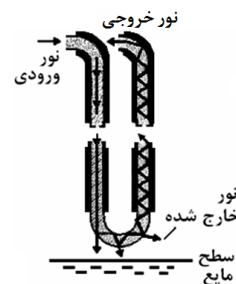
در گزارشی دیگر، روشی نظری مبتنی بر تشدیدگر حلقوی پیشنهاد شده که به طور هم‌زمان تغییرات ضریب شکست و دما را اندازه‌گیری می‌کند. تحلیل نشان داده که در طول موج ۷۸۰ نانومتر حد آشکارسازی ضریب شکست و دما به ترتیب RIU 10^{-7} و 10^{-3} K بوده است [۹۲].

در اینجا، با در نظر گرفتن پاسخ تشدیدگر در حالت پایا، تحلیل به کارگیری یک تشدیدگر حلقوی فیبر نوری در حسگر کمیت‌های فیزیکی مانند فشار و دما ارائه شده است.

۱.۱.۰ ساختار حسگر مبتنی بر تشدیدگر

ساختار اساسی یک تشدیدگر حلقوی فیبر نوری FORR از یک جفتگر فیبر نوری ۲×۲ تشکیل شده که حلقه تشدید آن با اتصال یک درگاه ورودی به یک درگاه خروجی با یک قطعه فیبر نوری تک مد ایجاد می‌شود. مطابق شکل ۱۶، طول حلقه تشدیدگر، $\alpha = \exp(-2\alpha_0 L)$ و α_0 (dB/m) به ترتیب ضریب تلفات خمشی، ضریب انتقال حلقه، κ ضریب تزویج جفتگر، γ تلفات الحاقی جفتگر، τ زمان تأخیر حلقه، $E_{in}(t)$ میدان ورودی و $E_{out}(t)$ خروجی است. برای تحلیل پاسخ تشدیدگر به عنوان یک حسگر، تلفات در حلقه فقط ناشی از تلفات بزرگ‌خمش فرض شده و از سازوکار تلفات دیگر مانند تلفات ذاتی و تلفات ناشی از پیوندگاه صرف نظر شده است.

زمانی که حلقه تشدیدگر به عنوان عنصر حسگر در معرض کمیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری قرار بگیرد، فاز موج منتشره در حلقه تشدید متحمل تغییر می‌شود. اگر n ضریب شکست مغزی فیبر باشد، تغییر فاز $(\delta\phi/\delta s)$ ناشی از کمیت فیزیکی s در مسیر نوری nL برابر است با [۹۳]:



شکل ۱۵. حسگر فیبر نوری برای اندازه‌گیری سطح مایع.

۹. حسگرهای فیبر نوری سطح مایع

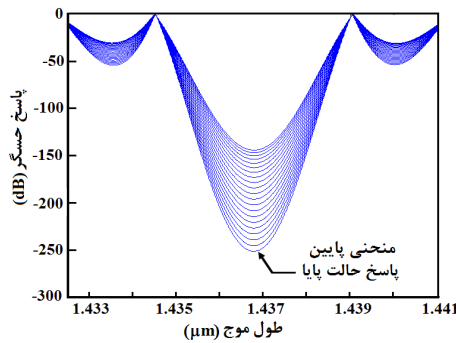
حسگرهای فیبر نوری برای اندازه‌گیری یا آشکارسازی سطح مایع که بر اساس تغییرات ضریب شکست فیبر نوری کار می‌کنند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این حسگرها سوییچ‌هایی هستند که سطح مایع را نشان می‌دهند.

این نوع حسگرهای فیبر نوری همانند شکل ۱ بر اساس تغییر ضریب شکست فیبر نوری بدون غلاف عمل می‌کنند. مطابق شکل ۱۵، قسمتی از فیبر بدون غلاف که در تماس با مایع قرار می‌گیرد، به دلیل بالاتر بودن ضریب شکست مایع از ضریب شکست مغزی فیبر، مقداری از نور منتشره در این قسمت از فیبر، به بیرون از مغزی نشت می‌کند و به انتهای خروجی نمی‌رسد. بدین ترتیب تلفات انتشار نور افزایش می‌یابد. با افزایش تلفات و کاهش در انرژی نور دریافتی از انتهای خروجی، مشخص می‌شود سطح مایع به ارتفاع مورد نظر رسیده است [۷۱-۷۹].

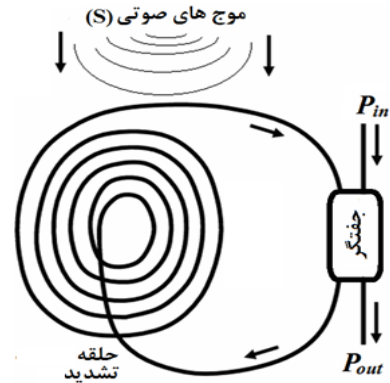
۱۰. حسگر نوری مبتنی بر تشدیدگر حلقوی فیبر نوری

در دو دهه اخیر تشدیدگرهای حلقوی فیبر نوری به صورت میکروساختارهای فیبری و موجبر تخت نوری در کاربردهای زیادی، مانند بیوحسگرها، برگردان سوییچ^۱ نوری، هم تافتگرهای حذف/اضافه، تشدیدگرهای لیزری، جبران‌سازهای پاشش، دوپاداری نوری و فیلترهای نوری مورد استفاده و تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند [۸۰-۸۸]. جدیدترین کار استفاده از تشدیدگر حلقوی با حلقه فیبر کریستال فوتونی است که برای فیلترهای نوری کوک‌پذیر پیشنهاد شده است [۸۹].

۱. Switches



شکل ۱۷. پاسخ حسگر در حالت پایا و حالت‌هایی که کمیت فیزیکی اعمال شده است.



شکل ۱۶. ساختار حسگر مبتنی بر تشدیدگر حلقوی فیبر نوری.

مدوله‌سازی دامنه و ϕ_{FM} زاویه بین انحراف بسامد نوری و مدوله‌کننده دامنه ناشی از جریان گرفته شده از LD، و $C = [\alpha\kappa(1-\gamma)]^{1/2}$ ، $B = (1-\kappa)(1-\gamma)\alpha^{1/2}$ ، $A = [\kappa(1-\gamma)]^{1/2}$ مقدارهای ثابت برای یک تشدیدگر معین هستند.

۲.۱۰. پاسخ حسگر

پاسخ حالت پایای تشدیدگر بر اساس رابطه (۷) بر حسب فاز $\omega\tau$ موج چرخشی در حلقه تشدیدگر در بازه طول موج ۱/۴۳۲۵ تا ۱/۴۴۱ میکرومتر در شکل ۱۷ نشان داده شده که در آن مقادیرهای $\lambda = 1550$ nm، $\gamma = 0.35$ ، $\kappa = 0.35$ ، $\alpha = 0.99$ ، $k_m = 0.4$ ، $k_f = 250 \times 10^{12}$ (Hz/mA)، $I_m = 20$ mA و $\pi\phi_m = 2$ ، $f_m = 95 \times 10^9$ Hz، $L = 19.0033$ mm و $\Delta n = 0.05$ جایگزین شده‌اند.

اگر کمیت فیزیکی مورد نظر برای اندازه‌گیری در امتداد طول حلقه اعمال شود، باعث تغییر طول حلقه شده و مطابق شکل ۱۷، بر پاسخ نهایی تشدیدگر به عنوان حسگر اثر می‌گذارد.

این شکل پایین‌ترین منحنی پاسخ در حالت پایا در طول موج ۱/۴۳۶۷ میکرومتر را نشان می‌دهد که طول حلقه تشدید ۱۹/۰۰۳۳ میلی‌متر است و آن زمانی است که کمیت فیزیکی هنوز اعمال نشده است.

حال اگر طول حلقه با گام ۱۰۰ نانومتر افزایش یابد (رابطه ۶)، عمق فرو رفتگی در پاسخ حسگر (شکل ۱۷) مطابق رابطه $\gamma = 5.5e+0.04 * x - 4.3e+0.02$ در طول موج ۱/۴۳۶۷ میکرومتر به طور خطی تغییر می‌کند که در شکل ۱۸ نشان داده

$$\frac{\delta\phi}{\delta s} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{L\delta n}{\delta s} + \frac{n\delta L}{\delta s} \right], \quad (4)$$

که در آن λ طول موج نور است. رابطه (۴) نشان می‌دهد که کمیت فیزیکی باعث تغییر مستقل ضریب شکست و طول حلقه می‌شود. اگر فرض کنیم که حلقه تشدید از یک فیبر دوشکست بنا شده باشد، فاز قطبشی به دست آمده در موج انتشاری در حلقه تشدید ناشی از دو مد قطبشی عمود برهم (n_p, n_q) برابر است با [۹۴]:

$$\phi_{pq} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_p - n_q) L. \quad (5)$$

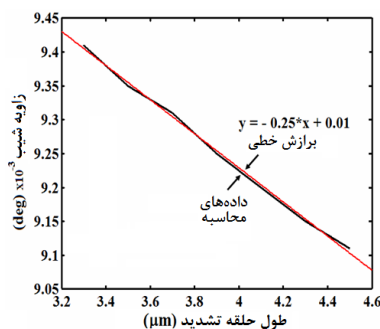
از طرفی میانگین فاز موج منتشره با بسامد زاویه‌ای ω در حلقه با تأخیر زمانی τ برابر با $\omega\tau$ است. بنابراین، از رابطه (۵) داریم:

$$\tau = \frac{1}{f\lambda} (n_p - n_q) L, \quad (6)$$

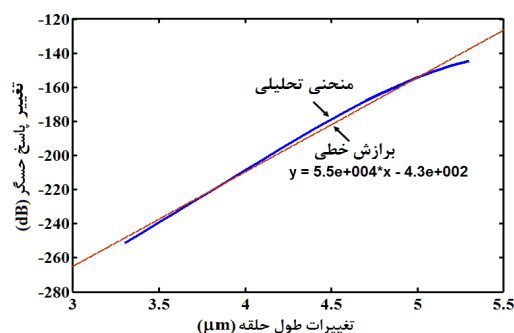
که در آن f بسامد نور است. اگر موج مدوله شده با بسامد زاویه‌ای ω از یک دیود لیزری (LD) با بسامد مدوله‌سازی ω_m را به عنوان سیگنال ورودی $E_{in}(t)$ برای تشدیدگر استفاده کنیم، می‌توانیم پاسخ انتقال FORR را بعد از N بار چرخش موج در حلقه تشدیدگر، به صورت زیر بیان کنیم [۸۹]:

$$P_{out}^{(N)} = -jA\sqrt{1+k_m \sin(\omega_m t)} \exp[-j\beta \cos(\omega_m t + \phi_{FM})] + jB \sum_{N=1}^{N=\infty} \left\{ \frac{C^{(N-1)} \sqrt{1+k_m \sin[\omega_m(t-N\tau)]}}{\exp\{j[-\beta \cos[\omega_m(t-N\tau) + \phi_{FM}]]\}} \right\}, \quad (7)$$

که در آن $\beta = k_f I_m / f_m$ ضریب مدوله‌سازی بسامد، k_f انحراف بسامد نوری (Hz/mA)، f_m بسامد زاویه‌ای مدوله‌سازی، I_m قله جریان مدوله‌ساز، k_m ضریب



شکل ۱۹. تغییر زاویه شیب پاسخ حسگر بر حسب تغییرات طول حلقه در طول موج ۱/۴۳۶۷ میکرومتر.



شکل ۱۸. تغییر پاسخ حسگر بر حسب تغییرات طول حلقه در طول موج ۱/۴۳۶۷ میکرومتر.

که در آن $C = 0/01$ ثابت انتگرال‌گیری بر حسب درجه بر واحد طول است. در این حالت، منحنی به دست آمده شیب ملایمی دارد و در مقایسه با شکل ۱۸، حساسیت اندازه‌گیری کمتر است.

۳.۱۰. اثر پارامترهای تشدیدگر بر پاسخ حسگر

پارامترهای تشدیدگر نیز می‌توانند بر پاسخ حسگر اثر بگذارند. در اینجا ضریب تزویج جفتگر κ ، تلفات الحاقی جفتگر γ و ضریب انتقال α در نظر گرفته شده‌اند و پارامترهای اثر گذار دیگر مانند پارامترهای دیود لیزری ثابت فرض شده‌اند [۸، ۹، ۸۷، ۸۸ و ۹۴].

در شکل ۲۰، اثرات پارامترهای κ ، γ و α بر پاسخ حسگر نشان داده شده‌اند. اثرات دو پارامتر κ و γ پاسخ را در دو نقطه متفاوت ($\gamma = 0/6$ ، $\kappa = 0/3$) به حداقل می‌رسانند. وقتی مقدار γ با κ برابر باشد، اثر γ بر پاسخ بیشتر است. اثرات این دو پارامتر بر پاسخ حسگر در برخی بازه‌ها در شکل ۲۰، رفتار خطی دارند و می‌توانند در تنظیم حسگر برای یک خروجی کنترل شده مورد استفاده قرار گیرند.

تغییر اثر α در بازه ۰/۱ تا ۰/۶ بر پاسخ حسگر تقریباً به صورت خطی است. با توجه به شکل ۲۰، اگر اعمال کمیت فیزیکی به نحوی باشد که ضریب انتقال α حلقه تشدید تغییر کند، این پارامتر نیز می‌تواند معیاری برای اندازه‌گیری باشد که بهترین حالت در بازه خطی ۰/۱ تا ۰/۶ است که باعث تغییرات -۷۰ dB در پاسخ حسگر شده است. [۹۴].

شده است. در این شکل، تغییر پاسخ حسگر $(\Delta\mathcal{R}/\Delta L)$ بر حسب تغییرات طول حلقه ترسیم شده است. در بازه ۳/۳ تا ۵/۳ میکرومتر، با تغییرات طول حلقه تشدید، شیب پاسخ حسگر خطی است. در این بازه، پاسخ از ۲۵۱/۵- دسی‌بل به ۱۴۴/۶- دسی‌بل افزایش نشان می‌دهد.

این منحنی را می‌توان با یک معادله مشتق خطی تقریب زد که به صورت زیر بیان می‌شود [۹۴]:

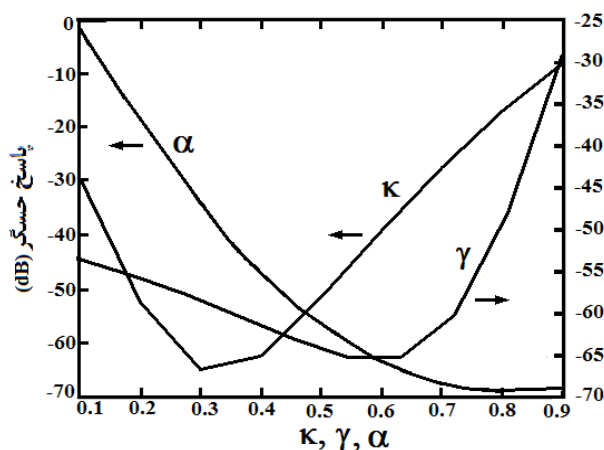
$$\lim_{L \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathcal{R}}{\Delta L} = \frac{d\mathcal{R}}{dL} = 55 \times 10^3 \Rightarrow \mathcal{R} = 55 \times 10^3 L + C, \quad (8)$$

که در آن $C = -430$ ثابت انتگرال‌گیری بر حسب دسی‌بل بر واحد طول است. ماهیت خطی معادله (۸) با شیب تیز می‌تواند اندازه‌گیری حساس کمیت فیزیکی اعمال شده به حلقه تشدید را فراهم سازد.

شکل ۱۷ نشان می‌دهد به ازای هر تغییر در مقدار کمیت فیزیکی، شیب منحنی پاسخ متناظر $(\Delta\mathcal{R}/\Delta\lambda)$ متحمل تغییر کاهشی می‌شود. در رژیم خطی پاسخ حسگر، کمیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری به حلقه تشدید اعمال شده و زاویه‌های شیب متناظر محاسبه شده و در شکل ۱۹ ترسیم شده است. بازه تغییرات طول حلقه تشدید از ۳/۳ میکرومتر تا ۴/۵ میکرومتر باعث کاهش زاویه شیب θ از $9/41 \times 10^{-3}$ درجه به $9/11 \times 10^{-3}$ درجه شده است.

شیب منحنی‌ها $(\Delta\theta/\Delta L)$ در این حالت نیز می‌تواند با یک معادله مشتق خطی با رابطه زیر تقریب زده شود [۹۴]:

$$\lim_{L \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta L} = \frac{d\theta}{dL} = -0/25 \Rightarrow \theta = -0/25 L + C, \quad (9)$$



شکل ۲. اثر تغییرات K ، α و γ بر پاسخ حسگر.

۱۱. نتیجه گیری

مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل تئوری نشان داده که اگر کمیت فیزیکی مورد اندازه گیری باعث تغییر طول حلقه تشدید به میزان ۱۰۰ نانومتر شود، حسگر طراحی شده قادر به آشکارسازی آن است. همچنین در این حسگر نشان داده شده که اگر کمیت فیزیکی به نحوی ضریب انتقال فیبر در حلقه را تغییر دهد، در یک بازه طول موج ۰/۱ تا ۰/۶، عملکرد حسگر خطی است و می تواند معیاری برای اندازه گیری در مقیاس نانو باشد.

نتیجه این تحقیق می تواند در طراحی هیدروفون ها، که مبتنی بر فشارسنجی موج های صوتی در زیر دریایی ها کار می کنند، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، در این تحقیق نشان داده شده که استفاده از تشدیدگر حلقوی فیبر نوری در حسگر نوری برای اندازه گیری کمیت فیزیکی مانند فشار و دما امکان پذیر است.

نظر به این که حسگرهای (فیبر) نوری به طور روزافزون در شبکه های حسگر بی سیم، در اینترنت اشیا، و شبکه های فیبر نوری مورد استفاده قرار می گیرند، در این مقاله، با توجه به اهمیت موضوع تحقیقاتی، جنبه های فنی، ویژگی ها و کاربردهای این نوع حسگرها مبتنی بر مدوله سازی داخلی و خارجی در طی دهه های اخیر مورد مرور و بررسی قرار گرفته و گزارش شده اند. نتیجه های این گزارش را طراح های این حسگرها در صنایع مختلف، دانشجویان مقطع های کارشناسی، ارشد رشته های فیزیک و مهندسی می توانند مورد استفاده قرار دهند. با استفاده از تشدیدگر حلقوی فیبر نوری، طراحی یک حسگر برای اندازه گیری کمیت فیزیکی مانند فشار و دما و عملکرد آن

مراجع

- Marcel Dekker Inc., New York (2002).
7. S Yin, P B Ruffin, F T S Yu, "Fiber Optic Sensors" (Eds.), 2nd Ed., CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA (2008).
8. G Rao (Ed.), "Optical Sensor Systems in Biotechnology", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009).
9. J Haus, "Optical Sensors: Basics and Applications", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Germany (2010).
10. S Soloman, "Sensors and Control Systems in Manufacturing", (2nd Ed.), McGraw-Hill Inc., New York, USA (2010).
11. L K Bandyopadhyay, S K Chaulya, P K Mishra, "Wireless Communication in Underground Mines: 1. H Osturberg, *Phys. Proc. NAS* **15** (1929) 892.
2. F Ansari (Ed.), "Applications of Fiber Optic Sensors in Engineering Mechanics", Am. Soc. Civil Engineers, New York, USA (1993).
3. V Ramamurthy and K S Schanze, "Optical Sensors and Switches", Marcel Dekker, Inc., New York (2001).
4. M Raymond Measures, "Structural Monitoring with Fiber Optic Technology", Academic Press, London, UK (2001).
5. Jose Miguel Lopez-Higuera, "Handbook of Optical Fibre Sensing Technology", John Wiley & Sons, New York, USA (2002).
6. F T S Yu, S Yin (Eds.), "Fiber Optic Sensors",

- Sensors and Actuators B: Chemical* **231** (2016) 696.
34. A Smirnov, E Rostova, G Dietler, S Sekatskii, "Long-life plastic optical fiber probes for scanning near-field optical microscope", *Proceeding of SPIE* **10711** Biomed. Imag. Sensing Conf., 107110P (2018), Yokohama, Japan.
 35. J L Plawsky, T A Hatton, *Appl Opt.* **27**, 20 (1988) 4200.
 36. Y T Yang, D Heh, P K Wei, W S Fann, M H Gray and J W P Hsu, *J. Appl. Phys.* **81** (1997) 1623.
 37. J T Motz, M Hunter, L H Galindo, J A Gardecki, J R Kramer, R R Dasari, and M S Feld, *Appl. Opt.* **43**, 3 (2004) 542.
 38. A Smirnov, V M Yasinskii, D S Filimonenko, E Rostova, G Dietler, and S K Sekatskii, *Hindawi Scanning* (2018) Article ID 3249189.
 39. <https://doi.org/10.1155/2018/3249189>.
 40. G Allwood, G Wild, and S Hinckley, *Electronics* **6**, 92 (2017) 1.
 41. R Willsch; W Ecke; G Schwotzer, "Spectrally encoded optical fibre sensor systems and their application in process control, environmental and structural monitoring", *Proceeding of SPIE Cong. Opt. and Optoelectron.*, Warsaw, Poland (2005) 59520I.
 42. R Willsch, W Ecke, H Bartelt, "Optical fiber sensor research and industry in Germany: Review and outlook", *Proceeding of SPIE 21st Int. Conf. Optical Fibre Sensors*, Ottawa, ON, Canada (2011) 775302.
 43. B Culshaw, A Kersey, *IEEE J. Lightwave Technol.* **26** (2008) 1064.
 44. B Culshaw, "Fibre optics in sensing and measurement-achievements and opportunities", *Proceeding of 2nd Int. Conf. Opto-Electron. Appl. Opt. (IEM OPTRONIX)*, Vancouver, Canada (2015) 1.
 45. O Esteban, M Cruz-Navarrete, A Gonza' lez-Cano, and E Bernabeu, *Appl. Opt.* **38**, 25 (1999) 5267.
 46. D H McMahon, A R Nelson, and W B Spillman Jr. *IEEE Spectrum* **18** (1981) 24.
 47. S Campopiano, A Cutolo, A Cusano, M Giordano, G Parente, G Lanza, and Laudati, *Sensors* **9** (2009) 4446.
 48. C-L Tien, C-C Hwang, H-W Chen, W F Liu, and S-Lin, *IEEE Transac. Magnetics* **42**, 10 (2006) 3285.
 49. F E Seraji, *Jpn J. Appl. Phys.* **32**, 4, Part 1, (1993) 1661.
 50. G Wang, K Pran, G Sagvolden, G B Havsgård, *Smart Mater. Structure* **10** (2001) 472.
 51. H-E Joe, H Yun, S-H Jo, M B G Jun, and B-K Min, *Int. J. Precision Eng. Manufact. Green Technol.* **5**, 1 (2018) 173.
 52. W Wang, N Wu, Y Tian, C Niezrecki, and X Wang, *Opt. Exp.* **18**, 9 (2010) 9006.
 53. Z Fang, K K Chin, R Qu, H Cai, "Fundamentals of Optical Fiber Sensors", John Wiley & Sons, New Jersey, USA, (2012).
 54. K T V Grattan and B T Meggitt, "Optical Fiber RFID-Based Sensor Networking", Springer, New York, USA (2010).
 12. Jin U Kang, "Fiber Optic Sensing and Imaging", Springer Science+Business, New York, USA (2013).
 13. D Krohn, MacDougall, A Mendez, "Fiber optic sensors: fundamentals and applications", 4th Ed., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Washington, USA (2014).
 14. J L Santos and F Farahi, "Handbook of Optical Sensors", CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA (2015).
 15. M Yasin, S W Harun and H Arof, "Optical Sensors New Developments and Practical Applications", Published by AvE4EvA (2014).
 16. H C Lefèvre, "The Fiber-Optic Gyroscope", 2nd Ed., Artech House, Boston, USA (2014).
 17. I Meglinski (Ed.), "Biophotonics for Medical Applications", Woodhead Publishing Limited (Elsevier), Amsterdam, Holland (2015).
 18. B D Gupta, S K Srivastava. R Verma, "Fiber Optic Sensors Based On Plasmonics", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore (2015).
 19. S Pissadakis and S Selleri (Eds.), "Optofluidics, Sensors and Actuators in Microstructured Optical Fibers", Woodhead Publishing (Elsevier), Amsterdam, Holland (2015).
 20. A Brahme (Ed.), "Comprehensive Biomedical Physics", Elsevier, Amsterdam, Netherlands (2014).
 21. CISCO Paper release, "CISCO Visual Network Index: Forecast and Methodology, 2015-2020" (2016).
 22. S Jankowski, J Covello, H Bellini, J Ritchie, and D Costa, "The Internet of Things: Making sense of the next mega-trend", Goldman Sachs (2014).
 23. A Al-Fuqaha, M Guizani, M Mohammadi, M Aledhari, and Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials* **17**, 4 (Fourth Quarter) **2015** (2015) 2347.
 24. L Atzori, A Iera, and Morabito, *Computer net.* **54** (2010) 2787.
 25. L Atzori, A Iera, G Morabito, *IEEE Commun Lett.* **15** (2011) 1193.
 26. I Padron (Ed.), "Interferometry-Research and Applications in Science and Technology", ITexLi 2nd Ed., USA, (2016).
 27. E Harris, Y Li, L Chen, and X Bao, *Appl. Opt.* **49**, 29 (2010) 5682.
 28. G Weihs; M Reck, H Weinfurter, A Zeilinger, *Opt. Lett.* **21**, 4 (1996) 302.
 29. W E Williams, "Applications of Interferometry", (5th Ed.), John Wiley & Sons, New York, USA (1950).
 30. B Culshaw and I P Giles, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16** (1983) 5.
 31. G Bertocchi, O Alibart, D B Ostrowsky, S Tanzilli, P Baldi, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **39** (2006) 1011.
 32. G Pascoli, *Comptes Rendus Physique* **18** (2017) 563.
 33. Li-Peng Sun, J Li, L Jin, Y Ran, Bai-Ou Guan,

- pplications” New India Publishing, New Delhi, India (2006).
74. J U Kang (Editor), “*Fiber Optic Sensing and Imaging*”, Springer New York, USA (2013).
 75. D Krohn, T MacDougall, A Mendez, “*Fiber optic sensors: Fundamentals and Applications*”, SPIE Press, Washington, USA (2014).
 76. M Yasin, S W Harun and H Arof (Editors), “*Optical Sensors: New Developments and Practical Applications*”, AvE4EvA MuViMix Records (2014).
 77. Y Zhao, Y Jin, J Wang, X Dong, *Optik* **124**, 18 (2013) 3771.
 78. W Han, Z Tong, Y Cao, *Opt Commun.* **321** (2014) 134.
 79. Z Wang, Z Tan, R Xing, L Liang, Y Qi, S Jian, *Opt. & Laser Technol.* **84** (2016) 59.
 80. P Nath, P Datta, K Ch Sarma, *Microwave Opt. Technol. Lett.* **50**, 7 (2008) 1982.
 81. R W Boyd, J H Heebner, *Appl Opt.* **40** (2001) 5742.
 82. L Junqing, L Li, Z Jiaqun, L Chunfei, *Opt Commun.* **256**, 4-6 (2005) 319.
 83. O Schwelb, *Opt. Commun.* **265**, 1 (2006) 175.
 84. S L McCall, A F J Levi, R E Slusher, S J Pearton, R A Logan, *Appl. Phys. Lett.* **60** (1992) 289.
 85. S Hao, C Jian-Ping, L Xin-Wan, W Yi-Ping, *Opt. Commun.* **262**, 2 (2006) 200.
 86. Y Dumeige, C Arnaud, and P Féron, *Opt. Commun.* **250**, 4-6 (2005) 376.
 87. F E Seraji and F. Asghari, *Opt. & Laser Technol.* **42** (2010) 115.
 88. F E Seraji, *Prog. Quant. Electron.* **33**, 2-4 (2009) 110.
 89. F E Seraji, *Progress Quant. Electron.* **33**, 1 (2009) 1.
 90. K Shalmashi, F E Seraji, and M R Mersagh, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* **58** (2012) 20502.
 91. X Zhao, J M Tsai, H Cai, X M Ji, J Zhou, M H Bao, Y P Huang, D L Kwong, and A Q Liu, *Opt. Exp.* **20**, 8 (2012) 8535.
 92. F Xu, V Pruneri, V Finazzi, and G Brambilla, *Opt. Exp.* **16**, 2 (2008) 1062.
 93. N Lin, L Jiang, S Wang, L Yuan, and Q Chen, *Chin. Opt. Lett.* **10**, 5 (2012) 052802.
 94. K T V Gratttan and B T Meggitt, “*Optical Fiber Sensor Technology*”, Kluwer Acad. Publishers, The Netherlands (2000).
 95. M E Seraji, F E Seraji, H Golnabi, *Int. J. Opt. App.* **2**, 5 (2012) 76.
 - “*Sensor Technology: Fundamentals*”, Springer Science+Business Media New York, USA (2000).
 55. Z Wang, M Jiang, H Xu, R Du, *Procedia Eng.* **29** (2012) 4234.
 56. Q Wu, Y Semenova, P Wang, A M Hatta, and G Farrell, *Meas. Sci. Technol.* **22** (2011) 025203.
 57. J W Berthold III, *J. Lightwave Technol.* **13**, 7 (1995) 1193.
 58. I Padron (Ed.), “*Interferometry: Research and Applications in Science and Technology*”, (2nd Ed.) ITexLi Publisher (2016).
 59. T-H Lee, F-T Hwang, W-T Shay, and C-T Lee, *Microwave and Opt. Technol. Lett.* **48**, 9 (2006) 523.
 60. E Reyes-Vera, C Jiménez-Durango, M Varon, “*Fourier Scheme for the Fiber Loop Mirror Temperature Sensor Based on Indium-filled Side-hole Photonic Crystal Fiber*” Int. Conf. Electromagnetics Advan. App. (ICEAA) 2018, Cartagena des Indies, Colombia (2018).
 61. Y Yang, Y Wang, Y Zhao, J Jiang, X He, W Yang, Z Zhu, W Gao, and L Li, *Opt. Exp.* **25**, 26 (2017) 33291.
 62. C Okawara and K Saijyou, *Acoust. Sci. & Tech.* **29**, 3 (2008) 232.
 63. R Sato and S Saito, *Jpn J. Appl. Phys.* **52** (2013) 012501.
 64. N Lagakos, W J Trott, T R Hickman, J H Cole, and J A Bucaro, *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-18**, 10 (1982) 1633.
 65. T G Giallorenzi et al, *IEEE J. Quant. Electron.* **QE-18**, 4 (1982) 626.
 66. R Main, *Sensor Review* **5**, 3 (1985) 133.
 67. R A Berg et al, *IEEE J. Lightwave Technol.* **LT-2** (1984) 91.
 68. B Y Kim et al., *IEEE Spectrum* (1986) 54.
 69. J A Bucaro, H D Dardy, and E F Carome, *Appl. Opt.* **16** (1977) 1761.
 70. A M Scheggi, “*Optical Fibres in Medicine*”, Proceeding of 2nd Intl Optical Fiber Sensor Conf., Berlin: VDE-Verlag GmbH, (1984) 93.
 71. F E Seraji, G S Pandian, *Institute of Engineers J. -EL (India)* **72** (1991) 83.
 72. E Udd, W B Spillman, Jr “*Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*”, John Wiley & Sons, New Jersey, USA (2011).
 73. B D Gupta, “*Fiber Optic Sensors: Principles and*