بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

طراحی و شبیه سازی حسگر فشار فیبر نوری توری براگ برای شرایط کمینه اتلاف

نگارش

هدی لطفی

استاد راهنما:دکتر محمود صیفوری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی برق(الکترونیک)

شهریور ۹۳

باسمه تعالی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **هدی لطفی** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه/رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقررات، ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی است.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضاء

قدردانی و تشکر

جناب آقای دکتر محمود صیفوری استاد راهنما:

:شما روشنایی بخش تاریکی جان هستی و ظلمت اندیشه را نور می بخشی. چگونه سپاس گویم مهربانی و لطف شما را که سرشار از عشق و یقین است. چگونه سپاس گویم تأثیر علم آموزی شما را که چراغ روشن هدایت را بر کلبه ی محقر وجودم فروزان ساخته است. آری در مقابل این همه عظمت و شکوه شما مرا نه توان سپاس است و نه کلام وصف.

و از جناب آقای مهندس محمد جواد یحیی پور که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داه اند، کمال تشکر را دارم.

تقدیم:

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به:

-محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی ام انجام داده اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته اند.

-به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.

-به استادان فرزانه و فرهیخته ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.

-به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.

-به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه ی راهم بود.

-الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته ی آنان جامه ی عمل بپوشانم.

-پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.

-خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

چکیده

با پیشرفت علم در زمینه مخابرات نوری و الکترواپتیک نمونه ی جدیدی از حسگرهای فیبرنوری مورد توجه قرار گرفته است. حسگرهای توری براگ فیبری از یک توری فیبری بازتابی تشکیل شده است. این توری ها از طریق ایجاد تغییرات ضریب شکست هسته فیبر نوری در اثر تابش فرابنفش ساخته می‌شود. در این تحقیق به معرفی توری براگ فیبرنوری و بررسی چگونگی حساس سازی آن به تغییرات ضریب شکست محیط پرداخته خواهد شد. سپس روابط میدان مد هسته، مد غلاف و چگونگی محاسبه ضریب شکست موثر آن‌ها به طور کامل شرح داده شده است. اندازه‌گیری فشار یکی از موارد کاربردی این حسگرها است که در این پایان نامه به آن پرداخته شده است. این حسگرها قادر به اندازه گیری فشار اعمالی در راستای محوری و شعاعی فیبرنوری هستند و حسگر فشار توری براگ فیبرنوری در این پایان نامه با استفاده ازفیبر نوری SMF ۲۸ که پرکاربردترین فیبرنوری تجاری است شبیه سازی شده است.

یکی از مشکلات پیش رو در کاربرد این حسگرها تداخل حساسیت بین پارامترهای گوناگون اندازه گیری می‌باشد که راهکارها و روش‌های گوناگونی برای جلوگیری از این پدیده‌ی نامطلوب پیشنهاد شده‌است. استفاده هم‌زمان از چند توری پشت سرهم از جمله روش‌های جلوگیری از تداخل حساسیت است که نمونه های مختلف کاربردی آن شبیه‌سازی شده است. در ادامه مقایسه و بررسی وابستگی پارامتر تیزی، تعداد المان های توری، طول توری و ضریب شکست مدی به این نتیجه رسیدیم که محدوده تغیرات پارامتر تیزی از ۰/۱ تا ۱۰ است که در ۰,۱ اتلاف به db ۹۰/۵۱۴۷- و بالاتر از ۵ اتلاف db۱۲۰- است. در نتیجه با افزایش پارامتر تیزی اتلاف کاهش می یابد. در المان های توری محدوده تغییرات از mm۱ تا mm۱۰۰ است که در mm ۱ اتلاف db۱۲۰- و در mm ۱۰۰ اتلاف db ۱۴۴/۳۴۴- است. در طول توری محدوده تغییرات ۱۰۰۰۰تا μm۶۰۰۰۰ است که در μm ۱۰۰۰۰ اتلاف db ۸۸/۷۲۶- و در طول توری μm ۴۰۰۰۰ اتلاف بهdb ۱۶۸/۵۷۷- رسیده است که با افزایش طول توری اتلاف بیش از db۱۶۸/۵۷۷- کاهش نمی یابد و در ادامه با تغییرات بسیار کم ضریب شکست مدی در ۰/۰۰۰۱ اتلاف نصف می شود. در نتیجه اتلاف وابستگی بسیار زیادتری به اندازه ی ضریب شکست مدی نسبت به پارامترهای دیگر دارد. پس برای طراحی توری براگ فیبر نوری با اتلاف کم بهتر است پارامتر ضریب شکست مدی تغییر داده شود که بهینه ترین اتلاف است. در پایان حسگر فشار فیبرتوری براگ را در شرایط متفاوت و هم‌چنین اندازه گیری هم زمان فشار و دما با استفاده از توری‌های براگ فیبر Hi-Bi بررسی شده است.

کلید واژه ها: حسگر فشار، فیبر توری براگ، اتلاف، تداخل حسگری، ضریب شکست، بازتاب

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: حسگرضریب شکست توری براگ فیبرنوری ۱
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ کاربرد حسگرهای توری براگ فیبرنوری ۵
۱-۳ معرفی توری براگ فیبرنوری و چگونگی حساس‌سازی آن به تغییرات ضریب شکست محیط ۶
۱-۳-۱ تاریخچه حسگر ضریب شکست توری براگ فیبرنوری ۸
۱-۳-۲ انواع طیف های عبوری توری براگ فیبر نوری ۹
۱-۳-۳ پایدارسازی مایی حسگر ضریب شکست توری براگ فیبرنوری ۱۲
فصل دوم: معرفی مدها و تزویج مدی ۱۴
۲-۱ مقدمه ۱۵
۲-۲ مدها و میدان ها ۱۵
۲-۲-۱ رابطه پاشندگی و میدان مد هسته ۱۵
۲-۲-۲ رابطه پاشندگی و میدان مدهای غلاف ۱۷
۲-۳ ضرایب تزویج ۲۸
۲-۴ نظریه جفت شدگی مدی ۳۱
فصل‌سوم:شبیه‌سازی توری براگ فیبر نوری و تحلیل **۳۳**
۳-۱ مقدمه ۳۴
۳-۲ حساسیت به دما و کرنش در توری‌ها براگ فیبرنوری ۳۴
۳-۳ طراحی الگوریتم فیبر توری براگ فیبر نوری ۳۶
۳-۴ شبیه سازی حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری ۳۹
۳-۵ تداخل حساسیت ۴۷
۳-۵-۱ حسگر فیبری براگ با دو توری با طول موج‌های براگ متفاوت و حساس به‌یک پارامتر ۴۹
۳-۵-۲ حسگر فیبری منفرد توری براگ بادو بخش دارای قطر متفاوت ۵۲
۳-۶ وابستگی اتلاف در توری براگ فیبر نوری به تابع تیز شدگی ۵۵
۳-۷ وابستگی اتلاف به تعداد المان های توری ۵۷
۳-۸ وابستگی اتلاف به طول توری براگ ۵۸
۳-۹ وابستگی اتلاف به ضریب شکست مودی ۵۹
فصل چهارم: بررسی حسگر فشار توری براگ در شرایط متفاوت **۶۲**
۴-۱ شبیه سازی حسگر فیبری منفرد توری براگ با دو بخش دارای قطر متفاوت ۶۳
۴-۲ اندازه‌گیری هم زمان فشار و دما با استفاده از توری‌های براگ فیبر Hi-Bi ۷۰
۴-۲-۱ اصول حسگر فیبری Hi-Bi توری براگ ۷۰
۴-۳ حسگر فشار توری براگ فیبرنوری با پایه و اساس سیلندر ۷۳

۴-۴ معرفی توری با دوره تناوب ۷۷
۴-۵ اصول عملکرد توری ها با دوره تناوب طولانی ۷۸
۴-۶ حسگرهای توری های با دوره تناوب طولانی ۷۹
۴-۷ مقایسه حسگرهایکرنش و دمای توری هایی با تناوب طولانی با حسگرهای مشابه توری براگ فیبر نوری ۸۰
۴-۸ اندازه گیری دما و کرنش توسط یک توری ها با دوره تناوب طولانی ۸۱
۴-۸-۱ اندازه گیری دما ۸۱
۴-۸-۲ اندازه گیری کرنش ۸۲
۴-۸-۳ مقایسه‌ی حساسیت کرنش حسگرهای توری با دوره تناوب طولانی با حسگرهایی توری براگ فیبر نوری ۸۳
۴-۹ طراحی و شبیه سازی حسگر ترکیبی از فیبر توری براگ و فیبری با دوره تناوب طولانی ۸۴
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۸۹
۵-۱ نتیجه‌گیری ۹۰
۵-۲ پیشنهادات ۹۲
پیوست الف ۹۴
پیوست ب ۹۷
مراجع ۱۰۰

فهرست شکل ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۱-۱ الف - طرح الگوی فیبری براگ، ب - نمایه ضریب شکست هسته و ج - طیف انتقال ۷
شکل ۱-۲ طیف عبوری توری براگ فیبرنوری هنگامی که ضریب شکست محیطی بزرگتر از ضریب شکست غلاف فیبرنوری باشد ۱۰
شکل ۱-۳ طیف عبوری توری براگ فیبرنوری هنگامی که ضریب شکست محیطی برابر با ضریب شکست غلاف فیبرنوری باشد ۱۰
شکل ۱-۴ طیف عبوری توری براگ فیبرنوری هنگامی که ضریب شکست محیطی کوچکتر از ضریب شکست غلاف فیبرنوری است ۱۱
شکل ۱-۵ نمایی از منحنی ضریب شکست در بهترین حالت پاسخ‌گویی حسگر ۱۲
شکل ۱-۶ مسیر حرکت مدهای غلاف در فیبرنوری ۱۲
شکل ۱-۷ نمایی از توری براگ با غلاف کاهش یافته ۱۳
شکل ۱-۸ جابجایی طول موج در اثر تغییرات ضریب شکست محیط ۱۳
شکل ۲-۱ منحنی شدت موضعی نور برای مدهای غلاف مرتبه ۱تا ۴ ..... ۲۸
شکل ۲-۲ ثابت تزویج مد هسته با مد غلاف بر حسب مرتبه مد غلاف ۳۰
شکل ۳-۱ توری براگ به N لایه تقسیم شده است. ۳۷
شکل ۳-۲ طیف دلخواه ورودی درون یابی شده. ۳۸
شکل ۳-۳ توری شبیه سازی شده ۳۹
شکل ۳-۴دید کلی از میدان الکتریکی داخل توری براگ فیبری ۴۰
شکل ۳-۵ شدت‌های بازتابی(نمودار آبی رنگ) و عبوری(نمودار قرمز رنگ) برای یک حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری. ۴۱
شکل ۳-۶ نمودار اختلاف فاز ایجاد شده در طول توری براگ فیبرنوری برای طول موج‌های مختلف.. ۴۱
شکل ۳-۷ سمت راست، نمودار تاخیر زمانی توری براگ فیبرنوری برای طول موج‌های مختلف؛ سمت چپ، نمودار پاشندگی توری براگ فیبرنوری برای طول موج‌های مختلف. ۴۲
شکل ۳-۸ وضعیت شبیه سازی شده برای حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری و چگونگی تغییرات ضریب شکست القایی در طول آن ۴۲
شکل ۳-۹ تغییر جایگاه طول موج براگ نسبت به کرنش‌های اعمال شده به فیبر نوری ۴۳
شکل ۳-۱۰ نمودار طول موج توری براگ فیبرنوری شبیه سازی شده نسبت به کرنش اعمالی. ۴۳
شکل ۳-۱۱ نمودار تغییرات طول موج براگ توری براگ فیبرنوری شبیه سازی شده نسبت به کرنش اعمالی. ۴۴
شکل ۳-۱۲ شدت‌های بازتابی(نمودار آبی رنگ) و عبوری (نمودار قرمز رنگ) برای یک حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری که در آن کرنش اعمالی به شکل تابعی خطی از طول توری تغییر می‌کند ۴۵

شکل ۳-۱۳ وضعیت شبیه سازی شده برای حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری با تغییرات کرنش خطی و چگونگی تغییرات ضریب شکست القایی در طول آن ۴۵
شکل ۳-۱۴ شدت‌های بازتابی(نمودار آبی رنگ) و عبوری(نمودار قرمز رنگ) برای یک حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری که در آن کرنش اعمالی به شکل تابعی گوسی از طول توری تغییر می‌کند..... ۴۶
شکل ۳-۱۵ وضعیت شبیه سازی شده برای حسگر کرنش توری براگ فیبرنوری با تغییرات کرنش گوسی و چگونگی تغییرات ضریب شکست القایی در طول آن. ۴۶
شکل ۳-۱۶ شدت‌های بازتابی (نمودار آبی رنگ) و عبوری (نمودار قرمز رنگ) برای دو توری براگ پشت سر هم در شرایط تعادل ۴۸
شکل ۳-۱۷ وضعیت دو توری براگ با طول‌های ۵cm ، دوره تناوب‌های متفاوت و عمق مدولاسیون یکسان با فاصله ۱۰cmاز یکدیگر که در شرایط تعادل می‌باشند. ۴۹
شکل ۳-۱۸نمودار تاخیر و نمودار پاشیدگی ۴۹
شکل ۳-۱۹ تغییرات جایگاه‌های دو طول موج براگ برای حسگر دما و کرنش به طور همزمان. طول موج اول با تغییرات دما و طول موج دوم با تغییرات کرنش جابه جا شده است ۵۰
شکل ۳-۲۰ تغییرات طول موج براگ اول به ازای تغییر دمای اطراف فیبر نوری. ۵۱
شکل ۳-۲۱ تغییرات طول موج براگ دوم به ازای تغییر کرنش اطراف فیبر نوری. ۵۱
شکل ۳-۲۲وضعیت دو توری براگ با دوره های متناوب ۵۲
شکل ۳-۲۳ حسگر فیبری براگ با دو قسمت دارای قطر متفاوت برای اندازه‌گیری همزمان دما و کرنش ۵۳
شکل۳-۲۴ وابستگی اتلاف در توری براگ فیبر نوری به تابع تیز شدگی ۵۵
شکل ۳-۲۵ وابستگی اتلاف به تعداد المانهای توری ۵۷
شکل ۳-۲۶ وابستگی اتلاف به تغییر طول توری براگ فیبر نوری. ۵۹
شکل ۳-۲۷ وابستگی اتلاف به ضریب شکست مودی ۶۰
شکل ۴-۱ طول موج براگ بازتابی از دو توری براگ در وضعیت دما و کرنش یکسان ۶۴
شکل ۴-۲ طول موج براگ بازتابی از دو توری براگ با وضعیت دما و کرنش متفاوت ۶۵
شکل ۴-۳ دوره تناوب مدولاسیون دو توری براگ برای دما و کرنش یکسان ۶۵
شکل ۴-۴ دوره تناوب مدولاسیون دو توری براگ برای دمای یکسان و کرنش یکسان ۶۶
شکل ۴-۵ دوره تناوب مدولاسیون دو توری براگ برای دمای یکسان و کرنش متفاوت ۶۶
شکل ۴-۶ نمودارطول موج براگ نسبت به دما برای حسگر اول. ۶۷
شکل ۴-۷ نمودارطول موج براگ نسبت به دما و کرنش برای حسگردوم ۶۸
شکل ۴-۸ نمودارتغییرات طول موج براگ نسبت به دمابرای حسگر اول ۶۸
شکل ۴-۹ نمودار تغییرات طول موج براگ نسبت به تغییرات دما وکرنش برای حسگردوم ۶۹
شکل ۴-۱۰ نمودار تغییرات طول موج براگ نسبت به کرنش اعمال شده به حسگر دوم ۶۹
شکل ۴-۱۱ سطح مقطع یک فیبرنوری Hi-Bi. دو نقطه سیاه رنگ عناصر تنش القایی هستند ۷۰

شکل ۴-۱۲ طرح حسگر فشار توری براگ فیبرنوری با پایه و اساس سیلندر با دو غلاف و دارای جبران پذیری دمایی ۷۴
شکل ۴-۱۳ تغییر شکل غلاف حساسیت ۷۵
شکل ۴-۱۴ جفت شدگی مد پایه‌ی هدایت شده با مدهای پوسته در توری با دوره تناوب طولانی..... ۷۸
شکل ۴-۱۵ نمودار β از مکانیزم جفت شدگی مد در یک توری با دوره تناوب طولانی ۷۹
شکل ۴-۱۶ نمودار شدت‌های عبوری و بازتابی توری ها با دوره تناوب طولانی شبیه سازی شده..... ۸۱
شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات پیک کاهش نسبت به تغییرات دما. ۸۲
شکل ۴-۱۸ نمودار تغییرات پیک تضعیف طول موج تشدید نسبت به تغییرات کرنش ۸۳
شکل ۴-۱۹ نمودار تغییرات قله طول موج براگ بازتابی نسبت به تغییرات کرنش ۸۴
شکل ۴-۲۰ شدت‌های بازتابی و عبوری برای حسگر با سه توری ۸۵
شکل ۴-۲۱ توزیع شدت تابشی داخل فیبر و کاهش و تضعیف طول موج‌های تشدید و جفت شدن آن‌ها به داخل پوسته فیبر برای توری ها با دوره تناوب طولانی و فیبر توری براگ پشت سر هم. ۸۶
شکل ۴-۲۲ وضعیت توری‌های سه گانه و دوره تناوب و عمق مدولاسیون آن‌ها. در این شکل توری وسطی فیبر توری براگ و دو توری کناری توری ها با دوره تناوب طولانی می‌باشند. ۸۶
شکل ۴-۲۳ نمودار تغییرات طول موج تشدید ($\Delta\lambda_{res}$) نسبت به کرنش (ε) ۸۷
شکل ۴-۲۴ نمودار تغییرات طول موج براگ ($\Delta\lambda_B$) نسبت به دما ($T\Delta$) ۸۸
شکل ۴-۲۵ نمودار تغییرات طول موج تشدید ($\Delta\lambda_{res}$) نسبت به ضریب شکست محیط اطراف فیبر ($n\Delta$) ۸۸

عناوین جدول

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۳-۱ اعداد به‌دست آمده وابستگی اتلاف در توری براگ فیبر نوری به تابع تیز شدگی. ۵۶
جدول ۳-۲ اعداد به‌دست آمده در وابستگی اتلاف به تعداد المانهای توری ۵۸
جدول ۳-۳ وابستگی اتلاف به تغییر طول توری براگ فیبر نوری. ۵۹
جدول ۳-۴ وابستگی اتلاف به ضریب شکست مودی ۶۰

نمادها(علائم اختصاری)

نمادها(علائم اختصاری)

نماد	توضیح
λ_{FBG}^{co}	طول موج تشدید مد هسته
$\lambda_{FBG}^{cl,}$	طول موج تشدید مدهای غلاف
Λ_{FBG}	دوره تناوب توری براگ فیبرنوری
n_{eff}^{co}	ضریب شکست موثر مد هسته
$n_{eff}^{cl,v}$	ضریب شکست موثر مد غلاف
ν	مرتبه مدی
J	تابع بسل مرتبه اول
K	تابع بسل اصلاح شده مرتبه دوم
V	بسامد بهنجار
b	ضریب بهنجار
n_{co}	ضریب شکست هسته
n_{cl}	ضریب شکست غلاف
a_{co}	شعاع هسته
ω	بسامد زاویه ای
β	ثابت انتشار
E_{01}^{co}	ثابت بهنجارش
Z_0	امپدانس الکترومغناطیسی خلا
a_{cl}	شعاع غلاف
Φ, ψ	توابع پتانسیل برداری دیبای
μ	گذردهی مغناطیسی
ε	گذردهی الکتریکی
e_r	بردار شعاعی در مختصات استوانه‌ای
e_ϕ	بردار سمتی در مختصات استونه‌ای
e_z	بردار طولی در مختصات استوانه ای
N	تابع بسل مرتبه دوم یا تابع نیومن
n_3	ضریب شکست محیطی
$I_z(r)$	شدت موضعی نور در راستای محور Z
Λ	دوره تناوب توری
m	نمایانی
$\sigma(z)$	پوش تغییرات آهسته ضریب شکست

نماد	توضیح
$\sigma(z)n_{co}$	پیرایش توری براگ
$\sigma(z)n_{co}(1+\mathrm{m})$	بیشینه تغییر ضریب شکست القایی
$\sigma(z)n_{co}(1-\mathrm{m})$	کمینه تغییر ضریب شکست القایی
$\Delta\varepsilon(r,z)$	اختلال در ثابت گذردهی الکتریکی
$K_{v\mu}^{z}$	ضریب تزویج طولی بین مدهای $\boldsymbol{\mu}$ و v
$K_{v\mu}^{t}$	ضریب تزویج عرضی(شعاعی و سمتی) بین مدهای $\boldsymbol{\mu}$ و v
δ	تابع کرونکر
$A_{\mu}(z)$	دامنه میدان مد عرضی (راستای انتشار $+\boldsymbol{Z}$)
$B_{\mu}(z)$	دامنه میدان مد عرضی (راستای انتشار $-\boldsymbol{Z}$)
$K_{1v-1\mu}^{cl-cl}$	تزویج مد غلاف با مد غلاف
K_{1v-01}^{cl-co}	تزویج مد هسته با مد غلاف
K_{01-01}^{co-co}	تزویج مد هسته با مد هسته
A_{co}	دامنه مد هسته فرودی
B_{co}	دامنه مد هسته بازگشتی
A_{v}^{cl}	دامنه مد غلاف مرتبه v ام فرودی
B_{v}^{cl}	دامنه مد غلاف مرتبه v ام بازگشتی
δ_{01-01}^{co-co} δ_{1v-01}^{cl-co}	پارامترهای واکوکی
λ_{r}	طول موج بخش مرجع
λ_{s}	طول موج بخش حسگر
P_{s}	توان بازتابی از نیمه دارای پوشش کاهش یافته (حسگر)
P_{r}	توان بازتابی از مرجع
P_{rc}	توان نور حامل برای بخش مرجع
P_{sc}	توان نور حامل برای بخش حسگر
φ_{r}	فاز الکترکی بخش مرجع
φ_{s}	حسگر فاز الکتریکی بخش

فصل اول

حسگر ضریب شکست توری براگ فیبرنوری

۱-۱ مقدمه

در سال ۱۹۶۹ میلادی اولین فیبرهای نوری با همکاری دو کمپانی نیپن شیت[۱] و نیپن الکتریک[۲] برای اهداف مخابراتی ساخته شدند. البته در آن زمان این فیبرهای نوری دارای میرایی dB/Km ۱۰۰ بودند که به دلیل وجود ناخالصی‌های شیمیایی شیشه بود. با پیشرفت تکنولوژی فیبرهای نوری در ژاپن، ایالات متحده و انگلیس در سال ۱۹۷۶ میلادی میرایی این فیبرهای نوری به کمتر از 1dB/Km رسید. سپس از طول‌موج مادون قرمز به جای نور مرئی استفاده شد و امروزه میرایی کمتر از ۰,۲dB/Km است.

در سال ۱۹۷۸میلادی کن هیل[۳] تاثیر حساسیت نور برای فیبرهای نوری حاوی ژرمانیوم[۴] را کشف کرد که اشعه فرابنفش[۵] تغییر دائمی در شکست نور ایجاد می‌کرد. مرحله بعدی استفاده از این تاثیر و ایجاد شبکه براگ در داخل فیبرهای‌نوری بود. این فیبرهای‌نوری پیک طول موج‌های خیلی کوچک را می‌توانند منعکس کنند. طول موج این پیک‌ها با دما[۶] و کرنش تغییر می‌کند. حسگرهای مختلف مبتنی بر فیبرنوری توانایی به‌کارگیری هم‌زمان در یک رشته فیبرنوری را دارند. تئوری کار این حسگرها بر اساس توری فیبرنوری براگ است (این توری در اصطلاح FBG یا Fiber Bragg Grating نامیده می‌شود). شبکه براگ شامل اختلالات تناوبی یا غیرتناوبی ضریب شکست موثر[۷] در هسته یک فیبرنوری است این موضوع هنگامی به صورت برجسته مورد توجه قرار گرفت، بازتاب نور تابیده شده به داخل یک فیبرنوری تابعی از زمان است و هرچه زمان تابش بیشتر می‌شود، نور بیشتری بازتاب خواهد شد. توری ضریب شکست نوشته شده روی هسته‌ی فیبرنوری نتیجه‌ی الگوی شدت موج ایستا تشکیل شده و به وسیله‌ی بازتاب ۴ درصدی از انتهای فیبرنوری و نور انتشار یافته داخل فیبرنوری است. توری ضریب شکست با افزایش بازتابش رشد پیدا خواهد کرد. این موضوع به دلیل آن است که شدت الگوی موج ایستایی تشکیل شده افزایش پیدا می‌کند.

در آن زمان تغییر دوره‌ایی ضریب شکست در یک متر یا قسمت کمتری از توری براگ فیبرنوری با پهنای باند حدود ۲۰۰MHz بود، اما اهمیت کشف آن در کاربردهای آینده در کارهای ابتدایی آن زمان قابل تشخیص بود. این پدیده عجیب تعدادی از محققان را حتی تا دهه‌های اخیر بر روی گسترش و پیشرفت آن علاقه‌مند نگه داشته‌است. دلیل اصلی برای این کار این عقیده بود که نصب و اجرای آزمایش مرجع برای تولید این نوع از توری سخت است و هم‌چنین آن زمان گمان بر این

---

[1]- Nippon Sheet Glass
[2]- Nippon Electric
[3]- ken hill
[4] - Germanium
[5] - Ultra violet (UV)
[6] - Temperature
[7]- Effective Refractive Index

می‌رفت که این پدیده محدود به نوع خیلی خاصی از فیبرنوری است، که فقط در مرکز تحقیقات مخابرات کانادا وجود دارد. علاوه بر این گمان می‌شد که طول موج نوشتن توری ناحیه طیفی توری بازتابی، محدود به طیف نور مرئی است.

مشاهدات نشان داد که هر فیبرنوری با جنس ژرمانیم آلاییده شده در سیلیکون به تابش لیزر آرگون[1] حساسیت دارد و قابلیت کاربردهای توری فیبرنوری را دارا هست. همچنین از این ویژگی می‌توان برای تعیین اشتراکات ممکن بین دو تاثیر حساسیت به نور استفاده‌کرد. بروس[2] و همکارانش از جذب پرتو تابشی با طول موج ۴۸۸ nm خبر دادند.

در اثر تابش لیزر یون آرگون قوی به فیبرنوری با ناخالصی ژرمانیم، به مرور زمان شدت نور بازتابشی افزایش پیدا کرد. این افزایش تا بازتابش کامل نور لیزر ادامه یافت. آزمایش‌های طیفی غیرمستقیم با استفاده از تنظیم‌های دمایی و کرنش توری فیبرنوری نشان دادند که یک فیلتر توری براگ نازک به وجود آمده‌است. افزایش نور بازتابیده از فیبرنوری را به اثر غیر خطی حساس به نور نسبت می‌دهند. دلیل ایجاد توری، تشکیل موج ایستا در اثر تداخل نور بازتابشی از انتهای فیبرنوری و نور همدوسی اصلی تابانده شده‌است. در محل شکم‌های طول موج ایستا و در اثر پدیده غیر خطی حساس به نور، توری‌ها به وجود می‌آیند، توری‌های ایجاد شده در اثر این پدیده را توری‌های هیل[3] می‌نامند[۲و۱]. مشکل اصلی توری‌های هیل این است که آن‌ها فقط برای طول موج‌های نزدیک به طول موج نور ایجاد کننده خود می‌توانند نقش توری را ایفا کنند.

مطالعات نشان می‌داد که قدرت توری با توان دوم شدت نور سازنده آن افزایش می‌یابد. لذا فرآیند ایجاد توری یک فرآیند دو فوتونی است. در سال ۱۹۸۹میلادی ملتز[4] و همکارانش با انجام آزمایش نشان دادند که اگر به‌جای فرآیند دو فوتونی در طول موج ۴۸۸ نانومتر از فرآیند تک فوتونی در طول موج ۲۴۵ نانومتر برای ایجاد توری استفاده کنند بهره کار بالا می‌رود. ملتز از تکنیک هولوگرافیک عرضی در ایجاد توری استفاده کرد، این روش دارای دو مزیت است، اول این که توری براگ بدون برداشتن غلاف فیبرنوری در مغزی فیبرنوری نگاشته می‌شود. دوم اینکه فاصله بین توری‌ها به زاویه دو موج تداخل کننده وابسته است. فاصله بین توری‌ها مشخص کننده‌ی طول موج بازتابشی از توری براگ است. لذا با تغییر زاویه بین دو موج تداخلی، می‌توان توری‌های با قابلیت بازتابشی در گستره وسیعی از طول موج های ناحیه طیفی مورد دلخواه ساخت.

---

[1]- argon
[2] Bures
[3] - Hill
[4]-Meltz

حسگرهای فیبرنوری توری براگ توجه زیادی را در زمینه تحلیل تجربی تنش به سمت خود معطوف کرده‌اند. این حسگرها برای مواد جدید مانند شیشه و کامپوزیت[5] های فیبر کربنی مناسب هستند، که اغلب آنها در هواپیماها و نیروگاه‌های بادی و در شرایط تنش بالا استفاده می‌شوند. این حسگرها بسیاری از مزایای کرنش سنج‌های فویل فلزی متداول را دارا هستند.

فیبرهای توری براگ برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله سازه‌های ساختمانی(سدها)، تست های غیرمخرب (کامپوزیت‌ها، ورقه ایی‌ها)، سنجش از راه دور(چاه های نفت، کابل های برق، خطوط لوله، ایستگاه های فضایی)، سازه‌های هوشمند (بال های هواپیما، بدنه های کشتی)، اندازه‌گیری کرنش، فشار و دما مورد تحقیق قرار گرفته‌اند.

توری‌های براگ فیبرنوری با توجه به خواص آن‌ها در حال حاضر به عنوان عناصر بسیار مهم برای ارتباطات فیبرنوری و مؤلفه‌های سنجشی هستند. این توری‌ها به طور گسترده در ارتباطات از راه دور گوناگون، به عنوان خواص قابل تنظیم طول موج براگ و پهنای باند آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توری براگ فیبرنوری، یک فیلتر ساده و کم هزینه‌ی انتخابی طول موج است این فیلتر کاربردهای گسترده‌ای دارد که هم کیفیت را بهبود می‌بخشد و هم موجب کاهش هزینه‌ی شبکه‌های توری می‌گردد. توری براگ فیبرنوری قسمتی از یک فیبر رایج تک مود چند سانتیمتری است که به شکل توری در آمده‌است. این توری توسط تغییر ضریب شکست هسته در راستای طول فیبرنوری ایجاد می‌شود. نور عبوری با طول موج مشخص، در جهت خلاف مسیری که از آن آمده، از توری انعکاس می‌یابد. طول موج‌هایی که انتخابی نیستند بدون تضعیف ناچیزی عبور می‌کنند. از مهم‌ترین مشخصه های توری براگ فیبرنوری این است که درآن‌ها طول موج‌های تشدید شده به سمت منبع منعکس شده و بقیه‌ی طول موجها بدون تضعیف از داخل قطعه عبور می‌کنند. این توری شامل تغیرات طول منظم در ضریب شکست هسته در طول فیبرنوری است. در حقیقت تفاوتی به اندازه ۰/۰۰۰۱ در ضریب شکست به منظور ایجاد تأثیرات مطلوب کافی است. طول موج بازتابی یک توری براگ به صورت زیر داده می شود.

$$\lambda_B = 2n\Lambda \qquad (۱-۱)$$

که در آن λ و n_{eff} و Λ به ترتیب طول موج براگ (طول موج بازتابی) ، متوسط ضریب شکست‌ها و دوره توری است. توری براگ به طور ساده، شامل مدولاسیون تناوبی از ضریب شکست در داخل مغزی فیبرنوری هست، ساختارهای توری مانند، در اپتیک موجبرهای تخت برای فیلتر کردن و تزویج نور به کار می‌روند.

[5] - Composite

همچنین اولین لیزر فیبرنوری از بازتابش توری فیبرنوری حساس به نور ساخته شد و عملکرد آن مورد تایید قرار گرفت. تابش فرابنفش به فیبرنوری باعث تغییر ضریب شکست آن در واحد 10^{-4} می‌شود. این مقدار میزان ناچیزی است، بنابراین چندین راهکار و روش برای زیاد کردن تغییر ضریب شکست در فیبرنوری که آن را به بالاتر از یک صدم افزایش دهد وجود دارد که این امر باعث افزایش بازتابش مؤثر طول موج‌های بازتابی خواهد شد. لمیر[1] و همکارانش نشان دادند که قرار دادن فیبرنوری در محیط مولکول‌های گاز هیدروژن باعث افزایش تغییر ضریب شکست القایی بر روی فیبرهای نوری استاندارد می‌گردد[۱].

۱-۲ کاربرد حسگرهای توری براگ فیبرنوری

استفاده از توری‌های براگ فیبرنوری[2] به عنوان حسگرها[3] برای اندازه‌گیری شاخصه‌های مختلفی از جمله دما، ارتعاش و کرنش، به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند[۳،۴و۵]. حساسیت بالا، وزن و اندازه کوچک، مصونیت از تداخل‌های الکترومغناطیسی، مقاومت در شرایط دشوار محیطی، قابلیت جای‌گیری در کامپوزیت‌ها و طول عمر بالا از جمله برتری‌های این حسگرها محسوب می‌شوند. از طرفی حسگرهای توری براگ دارای مزایای دیگری نسبت به دیگر انواع حسگرهای فیبرنوری است که از آن بین می‌توان به حساسیت بالاتر، پاسخ‌دهی سریع، رمزگذاری طول موجی، اشاره داشت[۶].

اشتعال‌ناپذیری این دسته از ادوات نوری، کاربرد آن‌ها را در محیط‌های خاص و حاوی مواد شیمیایی و گازهای آتش‌زا امکان‌پذیر می‌کند که در آن‌ها به‌کارگیری حسگرهای رایج الکترونیکی امکان‌پذیر نخواهدبود. از طرفی پایش دائم برخی محیط‌ها در صنعت نفت و گاز، دانش پیشرفته و صنعت هوا فضا بسیار ضروری است[۷].

این مهم، نیازمند طراحی و ساخت حسگری است که علاوه بر اشتعال ناپذیر بودن و توان پایش دائم محیط، از حساسیت بالا برخوردارباوده و پاسخ سریعی به تغییر ضریب شکست محیط در اختیار کاربر قرار دهد. بدین منظور به‌کارگیری حسگر توری براگ فیبرنوری انتخاب مفیدی به نظر می‌رسد. حس‌کردن تغییر ضریب شکست محیط پیرامون فیبرنوری با برپایی چیدمان آزمایشگاهی و با توجه به نیاز صنایع مختلف محسوب می‌شود، چرا که این حسگرها می‌توانند برای مطالعه روی ساختار مولکولی و شناخت ترکیب‌های معدنی، پزشکی، داروسازی، دانش پیشرفته و صنعت هوافضا و یا

[1]- Lemaire
[2]- Fiber bragg grating
[3]- Sensor

صنعت نفت و پتروشیمی به‌کاربرده می‌شوند[۸و۹]. در ادامه به طبقه‌بندی تنها چند نمونه از کاربردهای ذکر شده خواهیم پرداخت:

۱- در صنعت نفت و گاز، حسگرهای ضریب شکست توری براگ فیبرنوری در کنترل فرآیندها در لوله‌ها و نیروگاه‌ها یا در تعیین غلظت و تشخیص مواد تشکیل‌دهنده هیدروکربن‌ها کاربرد دارند. کاربرد جالب این حسگرها در پایش محیط‌زیست و هم‌چنین آشکارسازی بلادرنگ[1] نشت هیدروکربن ها است.

۲- این حسگرهای شیمیایی و بیوشیمیایی برای تعیین غلظت و ضریب شکست محلول‌های متنوعی مانند پروپیلن، گلادیون، دکستران، متانول و نیز نیترات در آب که در صنایع مختلف کاربرد فراوانی دارند، استفاده می‌شوند[۱۰-۱۲].

۳- می‌توان این حسگرها را در صنایع دفاعی و نظامی به عنوان فیلتر در محلول‌های هیدرازین و آب اکسیژنه استفاده کرد.

در این فصل پس از معرفی توری براگ فیبرنوری، به بررسی چگونگی حساس‌سازی آن به تغییرات ضریب شکست محیط و نیز معرفی تاریخچه‌ای از حسگر ضریب شکست توری براگ فیبرنوری خواهد پرداخت. پس از این شرح لزوم و نحوه پایدارسازی دمایی این حسگر خواهد آمد.

۱-۳ معرفی توری براگ فیبرنوری و چگونگی حساس‌سازی آن به تغییرات ضریب شکست محیط

توری براگ فیبرنوری، بخشی از هسته فیبرنوری است که توسط تابش فرابنفش[2] ، تغییرات متناوب ضریب شکست در آن ایجاد شده است[۱۳]. طبق قانون بازتاب فرنل، نور فرودی بر توری براگ بازتاب خواهدیافت. بدین ترتیب اگر نوری با پهنای طیف وسیع به توری براگ برخورد کند، بخش طیفی باریکی از آن به طول موج مرکزی λ_{Bragg} بازتاب یافته و بقیه طیف عبور می‌کند. طول موج بازتاب یافته از شرط بازتاب براگ (رابطه ۱-۱) حاصل می‌شود که در آن n_{eff}^{co} ضریب شکست موثر هسته و Λ فاصله بین دو تناوب توری مجاور در فیبرنوری است (شکل ۱-۱).

[1] Real time
[2]- Ultra violet (UV)