

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شیراز
دانشکده برق و الکترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی الکترونیک

عنوان :

بررسی انتشار پالس های نوری در فیبر های توری براگ غیرخطی
چیرپ شده

توسط :

هادی بشیری

استاد راهنما:

دکتر فرزین امامی

بسمه تعالی

بررسی انتشار پالس های نوری در فیبر های توری براگ غیرخطی چیرپ شده

پایان نامه ارائه شده به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی

توسط:

هادی بشیری

برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

گروه الکترونیک دانشکده مهندسی برق

دانشگاه صنعتی شیراز

ارزیابی پایان نامه توسط هیات داوران با درجه : عالی

دکتر فرزین امامی، استادیار دانشکده برق و الکترونیک(استاد راهنما).....

دکتر محسن حاتمی ، دانشیار دانشکده فیزیک(استاد مشاور).....

دکتر شاهرخ جم ، استادیار دانشکده برق و الکترونیک (داور).....

دکتر علیرضا کشاورز ، استادیار دانشکده فیزیک(داور)

مدیر امور آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه :.....

حق چاپ محفوظ و مخصوص دانشگاه صنعتی شیراز است

تقدیم به
پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

هادی بشیری

اسفند ۱۳۹۰

سپاسگزاری

در این راهی که از آغاز تا انجامش چند ماهی به طول انجامید اسباب زحمت عزیزانی را فراهم کرده بودم و از لطف بزرگانی برخوردار بودم که سپاسگزاری از آنان در اینجا به زبان قلم بر من فرض است. چرا که "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" هر چند که قلم را آن زبان نبود!

بزرگانی که با این پایان نامه اسباب زحمتشان را فراهم کردم نخست از استادم جناب آقای دکتر امامی که بر من منت نهادند و این افتخار را به من ارزانی داشتند که در نگارش این پایان نامه از راهنمایی ها و تجربه های علمی ایشان بهره مند شوم کمال تشکر و امتنان را دارم او بود که در امر نگارش علمی دستم بگرفت و پا به پا برد. نیز از جناب آقای دکتر حاتمی که افتخار بهره مندی از مشاورت و راهنمایی های دقیق و ارزنده ایشان را در انجام این پژوهش داشته ام کمال تشکر را دارم. همواره شرمنده اخلاق خوش این دو بزرگوار خواهم ماند بدون تردید اگر نقطه قوت و چشمگیری در این پژوهش باشد حاصل دستگیری این دو بزرگوار است. و اگر نقصی باشد ناشی از کوتاهی نگارنده.

هادی بشیری

اسفند ۱۳۹۰

چکیده

بررسی انتشار پالس در فیبرهای توری براگ غیرخطی چیرپ شده

به وسیله ی:

هادی بشیری

در این رساله برای اولین بار از یک روش نیمه تحلیلی بر مبنای سری فوریه برای آنالیز انتشار پالس های نوری در فیبرهای توری براگ چیرپ شده و فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی با در نظر گرفتن کلیه آثار غیر خطی در آنها ارائه شده است. در این روش با استفاده از آنالیز سری فوریه ابتدا معادلات پیچیده و غیر خطی توزیع مدها در فیبرهای توری براگ چیرپ شده و فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی به یک معادله مشتق جزئی مرتبه اول ساده شده و سپس با استفاده از روش آنالیز عددی رانگ-گوتا مرتبه ۴ و در نظر گرفتن مقادیر مرزی اولیه و همچنین روش تکرار ژاکوبی این معادلات حل می شوند. تاکنون راه حل کاملی برای حل این معادلات در فیبرهای توری براگ چیرپ شده ارائه نشده بود و فقط جواب های سالیتمونی با برخی ساده سازی ها ارائه شده بود. در فیبر های توری براگ دوره تناوب طولانی هم تنها انتشار پالس های نوری بدون در نظر گرفتن اثرات غیر خطی و برخی ساده سازی های دیگر ارائه شده بود. در این رساله نشان داده شد که چیرپ موجب جابجایی طول موج براگ و همچنین موجب فشرده شدن پالس های منعکس شده و در توری های براگ دوره تناوب طولانی موجب جابجایی طول موج تشدید می شود. همچنین اثرات پاشیدگی در فیبر های توری براگ هم به طور گسترده ای در هر دو نوع فیبر توری براگ چیرپ شده و فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که پاشیدگی مرتبه اول موجب جابجایی زمانی در قله پالس ورودی شده و بسته به علامت آن به سمت چپ یا راست جابجا می شود و پاشیدگی مرتبه دوم موجب پهن شدگی پالس نوری و کاهش توان قله پالس نوری می گردد مطالعه اثرات غیر خطی هم نشان داد که با افزایش توان ورودی بیشتر خود را نشان میدهند و موجب جابجایی طول موج براگ و در نتیجه موجب اثر کلید زنی می شوند و به ازای توان های ورودی کم قابل چشم پوشی هستند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه
۶	فصل دوم - تئوری فیبرهای توری براگ
۷	۱-۲ مقدمه
۸	۲-۲ حساسیت نسبت به فوتون ها
۹	۳-۲ تئوری مد های تزویج شده
۱۱	۱-۳-۲ بررسی معادلات مد تزویج شده در فیبر های توری براگ
۱۳	۴-۲ فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی
۱۵	۵-۲ توری های براگ چیرپ شده
۱۷	۶-۲ روش های شبیه سازی فیبرهای توری براگ
۱۸	۱-۶-۲ روش ماتریس انتقال
۲۳	۲-۶-۲ روش آنالیز عددی فیبر نوری براگ به روش چند لایه ای
۲۳	۱-۲-۶-۲ روش لایه نازک پشته‌ای
۲۵	۲-۲-۶-۲ روش ترینگ
۲۸	۷-۲ حل خطی معادلات تزویج شده
۲۹	۸-۲ باند ممنوعه فوتونی یا باند توقف
۳۱	۹-۲ فیبر توری براگ به عنوان فیلتر نوری
۳۳	۱۰-۲ سالیتون های براگ
۳۴	۱-۱۰-۲ شکل گرفتن سالیتون های براگ
۳۶	۱۱-۲ جمع بندی
۳۷	فصل سوم - روش های ساخت توری های براگ
۳۸	۱-۳ مقدمه
۳۸	۲-۳ تداخل سنج بدنه ای
۳۹	۳-۳ روش ماسک فاز
۴۰	۴-۳ ساخت ماسک فاز
۴۱	۵-۳ تداخل سنج ماسک فاز
۴۴	۶-۳ توری شیب شده
۴۶	۷-۳ تداخل سنج ماسک فاز جاروب کننده
۴۷	۸-۳ تداخل سنج آئینه و منشور تا شده
۴۹	۹-۳ نوشتن نقطه به نقطه
۴۹	۱۰-۳ توری های چیرپ شده
۵۲	۱۱-۳ ساخت توری های چیرپ شده پله ای
۵۳	۱۲-۳ ساخت توری های براگ دوره تناوب طولانی
۵۴	۱۳-۳ جمع بندی

۵۵	فصل چهارم- کاربردهای فیبر توری براگ
۵۶	۱-۴ کاربرد فیبرهای توری براگ چیرپ شده در جبران پاشیدگی
۵۹	۲-۴ کاربرد فیبرهای توری براگ در حسگرها
۶۰	۱-۲-۴ تئوری حسگرها از نوع توری براگ
۶۴	۲-۲-۴ کاربرد عملی توری براگ در حسگرها
۶۴	۱-۲-۲-۴ طراحی حسگر با استفاده از فیبر توری براگ چیرپ شده
۶۶	۲-۲-۲-۴ سنسور فشار با استفاده از فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی شیب شده
۶۸	۳-۴ کاربرد فیبر توری براگ در فیلترهای نوری
۶۸	۱-۳-۴ فیلترهای توری های براگ با فیدبک توزیع شده
۷۰	۲-۳-۴ فیلتر تداخل سنج مایکلسون
۷۱	۳-۳-۴ فیلترهای میان گذر توری از نوع پله‌ای
۷۳	۴-۳-۴ فیلتر نوری میان‌گذر بوسیله توری براگ با پهنای طیف قابل تنظیم و بدون پاشیدگی
۷۵	۴-۴ کاربرد فیبرهای توری براگ در ساخت لیزرها
۷۵	۱-۴-۴ کاربرد توری های براگ در لیزر حلقه ای با سه طول موج
۷۷	۲-۴-۴ لیزر از نوع <i>Q-switched</i> بر اساس مدولاسیون توری های براگ
۷۹	۳-۴-۴ لیزر <i>DFB</i> با دو طول موج
۸۰	۵-۴ جمع بندی
۸۱	فصل پنجم- الگوریتم عددی و نتایج شبیه سازی
۸۲	۱-۵ مقدمه
۸۲	۲-۵ بررسی انتشار پالس های نوری در فیبرهای توری براگ چیرپ شده دوره تناوب کوتاه
۸۴	۱-۲-۵ آنالیز انتشار پالس در فیبرهای توری براگ غیرخطی چیرپ شده به روش سری فوریه
۸۶	۲-۲-۵ نتایج شبیه سازی عددی برای فیبرهای توری براگ چیرپ شده دوره تناوب کوتاه
۸۷	۱-۲-۲-۵ اثر چیرپ خطی بر پاشیدگی در فیبرهای توری براگ
۸۸	۲-۲-۲-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با چیرپ خطی
۹۵	۳-۵ انتشار پالس در فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی
۹۵	۱-۳-۵ آنالیز انتشار پالس های نوری در فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی
۹۷	۲-۳-۵ نتایج شبیه سازی عددی برای فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی
۱۰۶	۴-۵ اثر چیرپ بر انتشار پالس های نوری در فیبرهای توری براگ دوره تناوب طولانی
۱۱۳	۵-۵ جمع بندی
۱۱۴	نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات
۱۱۵	مراجع

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۲ شکل یک فیبر توری براگ با فلش های نشان دهنده موجهای رفت و برگشت
۱۰	شکل ۲-۲ دیاگرام انتشار پالس نوری با طیف پهن در یک فیبر توری براگ
۱۰	شکل ۳-۲ طیف انتقال و انعکاس یک فیبر توری براگ
۱۳	شکل ۴-۲ طیف انتقال یک فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی
۱۵	شکل ۵-۲ توان منتقل شده برحسب توان ورودی برای یک فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی
۱۶	شکل ۶-۲ فیبر توری براگ با چیرپ خطی
۱۸	شکل ۷-۲ تغییرات ضریب شکست در هسته فیبر و میدانها در ابتدای فیبر و انتهای آن
۲۱	شکل ۸-۲ آنالیز توری براگ با قسمت کردن آن به تکه های کوچکتر در روش ماتریس انتقال
۲۱	شکل ۹-۲ تغییرات ضریب شکست در تکه ای از فیبر توری براگ برای دو میدان هم جهت
۲۴	شکل ۱۰-۲ الف) دو لایه (تکه) از فیبر توری براگ روی هم
۲۷	شکل ۱۱-۲ شدت موج برگشت به موج رفت و میزان پهنای پالس نسبت به سرعت انتشار
۲۸	شکل ۱۲-۲ محاسبه شدت های الف) $ e_1 ^2$ ب) $ e_2 ^2$ با استفاده از معادلات حل شده
۲۹	شکل ۱۳-۲ منحنی پاشیدگی و باند ممنوعه برای فیبر توری براگ
۳۱	شکل ۱۴-۲ پاشیدگی اعمالی توسط فیبر توری براگ برای مقادیر مختلف K و δ
۳۳	شکل ۱۵-۲ الف) ضریب انعکاس $ r_g ^2$ ب) فاز r_g که به عنوان تابعی از δ برای دو مقدار k_1
۳۵	شکل ۱۶-۲ شکل پالس های خروجی برای مقادیر مختلف δ وقتی پالس هایی با توان 11 GW/cm^2
۳۵	شکل ۱۷-۲ تغییر پهنای پالس در توان های بالا
۳۹	شکل ۱-۳ استفاده از اشعه ماورا بنفش برای ایجاد توری در فیبر های نوری
۳۹	شکل ۲-۳ شماتیک انکسار اشعه ماورابنفش هنگام برخورد با ماسک فاز
۴۰	شکل ۳-۳ اشعه ماورابنفش هنگام برخورد با ماسک فاز به مؤلفه های با مراتب ۱، ۰، ۱-
۴۲	شکل ۴-۳ استفاده از ماسک فاز به عنوان جداکننده اشعه برای نوشتن توری ها در فیبر
۴۲	شکل ۵-۳ طول موج براگ منحنی خط چین و همچنین نرخ تغییرات طول موج براگ
۴۳	شکل ۶-۳ (a) حذف مد صفر $m=0$ از منطقه ساخت توری به وسیله حرکت و شیفت دادن آینه ها (b) حذف مد صفر $m=0$ به وسیله کج کردن آینه های انعکاس دهنده اشعه.
۴۴	شکل ۷-۳ جایگذاری بلوک سیلیکا به جای دو آینه انعکاس دهنده
۴۵	شکل ۸-۳ (a) شیارها و توری های ایجاد شده برای یک توری کج شده (b) ایجاد توری کج شده با استفاده از آینه
۴۶	شکل ۹-۳ میزان همپوشانی دو اشعه که در برخورد با یکدیگر و درست کردن شیارهایی الماسی
۴۶	شکل ۱۰-۳ روش اسکن کردن ماسک فاز برای بدست آوردن توری با طول زیاد.
۴۷	شکل ۱۱-۳ تداخل سنج آینه ای Lloyd
۴۸	شکل ۱۲-۳ تداخل سنج به وسیله منشور Lloyd
۴۸	شکل ۱۳-۳ طول نرمالیزه شده توری نسبت به پهنای اشعه برحسب زاویه رأس منشور

- شکل ۳-۱۴ ایجاد توری ها در فیبر با روش نقطه به نقطه ۴۹
- شکل ۳-۱۵ ایجاد توری چیرپ شده به وسیله خم کردن فیبر ۵۰
- شکل ۳-۱۶ یک فیبر خم شده با شعاع R ۵۰
- شکل ۳-۱۷ ایجاد توری چیرپ شده به وسیله دو لنز با فاصله کانونی مختلف ۵۲
- شکل ۳-۱۸ ماسک فاز step-chirped ۵۳
- شکل ۳-۱۹ بلوک دیاگرام ساخت فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی ۵۴
- شکل ۴-۱ (الف) فیبر توری براگ با چیرپ خطی و طول L_g (ب) جبران سازی پاشیدگی توسط فیبر توری براگ با چیرپ خطی ۵۷
- شکل ۴-۲ وابستگی FOM به پهنای باند توری چیرپ شده ۵۹
- شکل ۴-۳ دیاگرام میزان کاربرد فیبر های براگ در ساخت حسگر های نوری ۶۰
- شکل ۴-۴ اثر پلاریزاسیون و انکسار مضاعف در فیبر توری براگ ۶۱
- شکل ۴-۵ یک فیبر توری براگ هنگامی که نیروی خطی بر آن وارد می شود ۶۲
- شکل ۴-۶ توزیع فضایی ضریب شکست در طول محور فیبر توری به طول $L=10mm$ ۶۲
- شکل ۴-۷ طول موج براگ با افزایش نیرو به سمت طول موج های بالاتر می رود. ۶۳
- شکل ۴-۸ جابجایی طیف انعکاس به علت اعمال فشار به توری براگ ۶۳
- شکل ۴-۹ شماتیک یک حسگر با استفاده از فیبر توری چرب شده و یک فیبر توری یکنواخت ۶۴
- شکل ۴-۱۰ پاسخ فاز سیستم ارائه شده که شیفت فاز بر حسب طول موج ۶۵
- شکل ۴-۱۱ تغییر فاز به عنوان تابعی از کشش در فرکانس مدولاسیون 2 GHz ۶۶
- شکل ۴-۱۲ ساختار یک سنسور فشار با استفاده از فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی شیب شده ۶۷
- شکل ۴-۱۳ توری از نوع فیدبک توزیع شده در کاربرد فیلتر میان گذر ۶۸
- شکل ۴-۱۴ طیف انتقال محاسبه شده برای توری با فیدبک توزیع شده (DFB) ۶۹
- شکل ۴-۱۵ شماتیک سری یک فیلتر با فیدبک توزیع شده و با جابجایی فازهای $\pi/2$ ۷۰
- شکل ۴-۱۶ طیف انتقال فیلتر با دو جابجایی فاز $1mm$ و ضریب شکست با عمق مدولاسیون 10^{-3} ۷۰
- شکل ۴-۱۷ یک فیلتر از نوع کوپلر با توری در یکی از بازوهای آن ۷۱
- شکل ۴-۱۸ فیلتر میان گذر و عبور ۱۰۰٪ پالس در طول موج براگ از پورت ۲ ۷۱
- شکل ۴-۱۹ انعکاس و تابش نور از هسته فیبر توری به سمت خارج از آن ۷۲
- شکل ۴-۲۰ طیف تلفات انتقال (انعکاس) فیبر توری براگ نوع کج شده ۷۳
- شکل ۴-۲۱ شماتیک فیلتر ارائه شده میانگذر، بدون دسپرشن و قابل تنظیم. ۷۳
- شکل ۴-۲۲ طیف انعکاس دو توری براگ چرب شده ۷۴
- شکل ۴-۲۳ طیف انعکاس فیلتر طراحی شده ۷۵
- شکل ۴-۲۴ دیاگرام فیلتر ارائه شده که از توری براگ ۷۶
- شکل ۴-۲۵ دیاگرام فیلتر ارائه شده که از توری براگ دو جابجایی فاز ۷۶
- شکل ۴-۲۶ دیاگرام لیزر حلقه ای طراحی شده توسط فیلتر توری براگ با سه باند عبور باریک ۷۷
- شکل ۴-۲۷ طیف خروجی لیزر حلقه ای طراحی شده در سه طول موج ۷۷
- شکل ۴-۲۸ لیزر تمام فیبر از نوع Q-switched ۷۸
- شکل ۴-۲۹ نمودار سمت راست پاسخ زمانی فیلتر همراه مدولاتور ۷۸
- شکل ۴-۳۰ دیاگرام فضایی توری براگ طراحی شده به عنوان کویتی لیزر DFB با ساختار متقارن ۷۹
- شکل ۴-۳۱ طیف انتقال توری طراحی شده با ۲ باند عبور در مرکز باند قطع ۷۹

- شکل ۴-۳۵ توان خروجی هر طول موج لیزر نسبت به توان ورودی و پاسخ زمانی لیزر در دو طول موج
- شکل ۵-۱ الگوریتم عددی ارائه شده برای حل معادلات غیر خطی فیبرهای توری براگ در حالت شبه پالس
- شکل ۲-۵ اثر چیرپ خطی بر پاشیدگی مرتبه اول
- شکل ۳-۵ اثر چیرپ خطی بر پاشیدگی مرتبه دوم (GVD)
- شکل ۴-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ یکنواخت (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۵-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با ضریب چیرپ خطی $c=5e-7mm^{-1}$ (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۶-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با ضریب چیرپ خطی $c=5e-6mm^{-1}$ (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۷-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با ضریب چیرپ خطی $c=5e-5mm^{-1}$ (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۸-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با ضریب چیرپ خطی $c=5e-6mm^{-1}$ و مقدار پاشیدگی بالا (۱) (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۹-۵ انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ با ضریب چیرپ خطی $c=5e-6mm^{-1}$ و مقدار پاشیدگی بالا (۲) (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۱۰-۵ اثرات غیر خطی بر انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ یکنواخت با افزایش توان ورودی برای (الف) پالس های پیش رونده و (ب) پالس های پس رونده
- شکل ۱۱-۵ انتشار پالس نوری در (الف) هسته LPFG و (ب) پوشش LPFG
به ازای $P_0=400W, \Delta=0, \kappa=100m^{-1}, V_g=100ps.m^{-1}$
- شکل ۱۲-۵ انتشار پالس نوری در (الف) هسته LPFG و (ب) پوشش LPFG
به ازای $P_0=400W, \Delta=-150m^{-1}, \kappa=100m^{-1}, V_g=100ps.m^{-1}$
- شکل ۱۳-۵ پوش انرژی پالس های نوری منتشر شده در LPFG به ازای
 $V_g=100ps.m^{-1}, \kappa=100m^{-1}, \Delta=-150m^{-1}$ و مقادیر مختلف انرژی ورودی
- شکل ۱۴-۵ انتشار پالس نوری در (الف) هسته LPFG و (ب) پوشش LPFG
به ازای $P_0=400W, \Delta=150m^{-1}, \kappa=100m^{-1}, V_g=100ps.m^{-1}$
- شکل ۱۵-۵ پوش انرژی پالس های نوری منتشر شده در LPFG به ازای
 $V_g=100ps.m^{-1}, \kappa=100m^{-1}, \Delta=150m^{-1}$ و مقادیر مختلف انرژی ورودی
- شکل ۱۶-۵ انتشار پالس های نوری در هسته LPFG با توان اولیه $P_0=400W$
به ازای (الف) $V_g=0$ ، (ب) $V_g=100ps.m^{-1}$ و (ج) $V_g=200ps.m^{-1}$
- شکل ۱۷-۵ سطح مقطع توان پالسهای خروجی از LPFG به ازای توان اولیه $P_0=400W$
و $\Delta=-150m^{-1}, \kappa=100m^{-1}$ به ازای مقادیر مختلف V_g
- شکل ۱۸-۵ انتشار پالس نوری در (الف) هسته LPFG و (ب) پوشش LPFG به ازای
 $P_0=625W, \Delta=0, \kappa=100m^{-1}, V_g=100ps.m^{-1}$

- شکل ۵-۱۹ انتشار پالس نوری در (الف) هسته LPFG و (ب) پوشش LPFG
 به ازای $P_0=900W, \Delta = 0, \kappa = 100m^{-1}, V_g = 100ps.m^{-1}$
- شکل ۵-۲۰ سطح مقطع توان پالس های خروجی از فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی به ازای مقادیر مختلف توان ورودی
- شکل ۵-۲۱ تغییرات ضریب تنظیم در امتداد طول فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی به ازای مقادیر مثبت ضرائب چیرپ خطی.
- شکل ۵-۲۲ انتشار پالس نوری در فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی با ضریب چیرپ خطی $c=0.0001mm^{-1}$ (الف) هسته (ب) پوشش
- شکل ۵-۲۳ انتشار پالس نوری در فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی با ضریب چیرپ خطی $c=0.001mm^{-1}$ (الف) هسته (ب) پوشش
- شکل ۵-۲۴ پوش انرژی پالس های نوری در فیبر توری براگ به ازای مقادیر مختلف ضریب چیرپ خطی مثبت
- شکل ۵-۲۵ تغییرات ضریب تنظیم در امتداد طول فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی به ازای مقادیر مثبت ضرائب چیرپ خطی
- شکل ۵-۲۶ انتشار پالس نوری در فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی با ضریب چیرپ خطی $c=-0.0001mm^{-1}$ (الف) هسته (ب) پوشش
- شکل ۵-۲۷ انتشار پالس نوری در فیبر توری براگ دوره تناوب طولانی با ضریب چیرپ خطی $c=-0.001mm^{-1}$ (الف) هسته (ب) پوشش
- شکل ۵-۲۸ پوش انرژی پالس های نوری در فیبر توری براگ به ازای مقادیر مختلف ضریب چیرپ خطی منفی

فصل اول

مقدمه

فیبرهای توری براگ ابزارهای قدرتمندی در زمینه هدایت و کنترل پالس های نوری هستند، این ابزارها به طور گسترده ای در سیستم های مخابرات فیبر نوری و همچنین انواع سنسور ها استفاده می شوند و امروزه توجه محققان زیادی را به سمت خود جلب کرده اند. این نوع فیبرها برای اولین بار در مرکز تحقیقات ارتباطات اتاوا کانادا در سال ۱۹۷۸ توسط شخصی به نام آقای کن هیل^۱ مطرح شد. در این فیبرها هسته فیبر با تزریق ناخالصی و تابش اشعه UV دارای ضریب شکست تناوبی شده که باعث ایجاد آثار غیر خطی و بعضی از رفتارها در این فیبرها می شود. فیبرهای توری براگ دارای کاربردهای فراوانی در طراحی المان های نوری از جمله سوئیچ های نوری، فیلتر های نوری، جبران کننده های پاشیدگی^۲ و لیزرها می باشند [۱-۳]. از نظر طول دوره تناوب در حالت کلی فیبرهای توری براگ به دو دسته دوره تناوب کوتاه^۳ و دوره تناوب طولانی^۴ تقسیم می شوند، در فیبرهای توری براگ دوره تناوب کوتاه فواصل بین توری ها از طول موج کاری فیبر توری براگ کوچکتر است. در این فیبرها پالس نوری اعمال شده در هسته منتشر می شود و پس از برخورد با توری ها قسمتی از آن منعکس می شود. در فیبرهای توری براگ دوره تناوب بلند فواصل بین توری ها به مراتب از طول موج کاری فیبر توری براگ بزرگتر است در این فیبرها پالس نوری علاوه بر هسته، در پوشش فیبر هم منتشر میشود و قسمتی از پالس اعمال شده به ورودی فیبر پس از برخورد با توری براگ به پوشش منتقل شده و هم جهت با هسته منتشر می شود. از زمانی که برای اولین بار فیبرهای توری براگ مطرح شدند با توجه به اینکه گستره وسیعی از کاربردها را پوشش میدهند ساختار آنها با توجه به کاربردهای تغییرات زیادی داشته است. یکی از مهمترین تغییرات اعمال چیرپ^۵ است که فاصله بین توری ها در امتداد طول فیبر توری براگ تغییر میکند. که می تواند شکل های مختلفی داشته باشد. چیرپ را می توان هم به ساختار دوره تناوب کوتاه و هم به ساختار دوره تناوب بلند اعمال کرد. یکی از مهمترین قابلیت های فیبرهای توری براگ استفاده در جبران کننده های پاشیدگی می باشد. به علت وابسته بودن پاشیدگی به طول موج، سیگنال ها با طول موج های مختلف در مقابل خود پاشیدگی های مختلفی می بینند. بنابراین استفاده تنها از فیبرهای جبران کننده پاشیدگی برای جبران پاشیدگی کافی نبوده و نمی تواند بطور مساوی تمام کانال ها را عاری از پاشیدگی نماید. از آنجا که مقدار طول موج براگ با تغییر موقعیت (حرکت در طول فیبر) به مقدار کمی تغییر می کند، طول موج های مختلف در مکان های مختلف انعکاس یافته و مسیر های مختلفی را در طول فیبر طی می کنند و در نهایت همه آنها یک پاشیدگی را تجربه می کنند [۲-۶]. به عبارتی دیگر جدا از خاصیت انعکاسی، توری ها نیز باعث ایجاد پاشیدگی مثبت و یا منفی در خطوط انتقال شده و می توان مقدار آن کم و یا زیاد کرد [۲-۶]. از مهمترین روش های جبران پاشیدگی استفاده از فیبرهای توری براگ چیرپ شده است. در این کاربرد از خاصیت

¹ Ken Hill

² Dispersion

³ Short-Period Fiber Bragg Grating

⁴ Long-Period Fiber Grating

⁵ Chirp

انعکاسی آنها استفاده می شود و هر قسمت از پالس در یک مکان مختلف از طول توری انعکاس یافته و پاشیدگی حاصله از فیبر نوری را جبران می کند. پاشیدگی موجود در فیبر های توری براگ همچنین باعث تغییر در پروسه های غیر خطی تبدیل فرکانس از قبیل تولید هارمونیک های مرتبه دوم [۷-۱۲]، آمپلی فایر های پارامتری (بر حسب χ^2 و χ^3 سوسپیتیلیتی غیر خطی) [۱۳-۱۵] می شود.

در توری های براگ به علت وابستگی ضریب شکست به شدت پالس ورودی، آثار غیر خطی در توری ها ایجاد شده که از این خاصیت می توان در کلید های نوری استفاده کرد. عمل کلیدزنی با استفاده از یک پمپ نوری و آثار غیر خطی [۱۶-۲۰] که ناشی از اثر کر است انجام می شود. در مرجع [۲۱] نیز در مورد آثار خطی و غیر خطی در فیبرهای نوری که باعث محدودیت هایی از قبیل اثر کر^۱، شکل هندسی فیبر و ... می شود، صحبت به میان آمده است. از جمله آثار غیر خطی بیان شده می توان به اثر متقابل دو پالس با طول موج ها و پلاریزاسیون مختلف و دوم سرعت حرکت سالیتون های براگ^۲ در داخل فیبر اشاره کرد. به عنوان مثال وقتی یک پالس بسیار قوی را همراه پالس با توان کم از فیبری توری براگ عبور می دهیم پدیده XPM ^۳ و آثار غیر خطی دیگر باعث می شوند سیگنال با توان کم تحت تاثیر پالس قویتر قرار گرفته و متناسب با پارامتر های مورد نظر در آمپلی فایر های پارامتری فشرده و یا پهن شود. به عنوان مثال در مرجع [۱۵] از فیبر توری براگ برای کم یا زیاد کردن سیگنال ها (مالتی پلکسر ها) در سیستم های مخابراتی و فرکانس های خاص استفاده کرده است. هنگامی که لیزر با توان نوری بالا به یک فیبر توری براگ برخورد می کند اثر کر در فیبر ایجاد شده و در نتیجه مشخصات طیفی فیبر های توری با توجه به توان پمپ ورودی بهبود می یابد. تغییرات ضریب شکست ایجاد شده در تزویج کننده های توری براگ در نهایت باعث ایجاد عمل کلید زنی می شود. به عبارت دیگر کلیدزنی نوری بر اساس تاثیر پالس های پمپ بر روی سیگنال هنگام عبور از توری می باشد [۱۵].

همانطور که قبلا گفته شد توری ها در ساخت فیلتر نوری نیز کاربرد دارند. استفاده از توری ها در طراحی فیلتر نوری برای اولین بار توسط آقای هیل در سال ۱۹۷۸ برای فیبری از سیلیکا به طول یک متر انجام شد که از آن به بعد این نوع فیلتر ها به نام توری های هیل^۴ نامیده شد [۱۳-۱۴]. در این وسایل طول موج هایی را که در بازه کوچک خاصی (در محدوده طول موج براگ) قرار می گیرند، انعکاس یافته که از این قابلیت می توان در فیلتر های نوری استفاده نمود [۱].

¹ Kerr Effect

² Bragg Solitons

³ Cross Phase Modulation

⁴ Hill Grating

⁵ Band gap

از جمله پدیده‌هایی که در سیستم‌های تناوبی اتفاق می‌افتد وجود باند‌های شکاف باند ممنوعه^۱ در طیف انتقال موج نوری می‌باشد [۲۲]. اگر فرکانس نور از مقدار تراز ممنوعه کمتر باشد نور در آن محیط نمی‌تواند انتشار یابد ولی اگر محیط دارای آثار غیر خطی باشد حتی اگر فرکانس نور کمتر از تراز ممنوعه باشد می‌تواند در آن محیط حرکت نماید. یکی از مثال‌های مهم در این زمینه سالیتون‌های براگ می‌باشند که می‌توانند با محیط‌های تناوبی و اثر غیر خطی کر پشتیبانی شوند. محیط طراحی شده در اینجا دارای ضریب شکست تناوبی و اثر کر زیاد است. این نوع توری تولید شده از دو جنبه با توری‌های موجود در فیبرهای معمولی فرق دارد: یکی عمق مدولاسیون و ضریب شکست آن که کاملاً وابسته به فرکانس و دوم اثر جذب نور می‌باشد که باعث می‌شود لبه‌های تراز ممنوعه محو و نامشخص گردد. از مزیت‌های استفاده از این محیط کم بودن توان مورد نیاز می‌باشد که علت اصلی آن اثر کر خیلی زیاد در محیط طراحی شده است.

از جمله مطالعات دیگر که اخیراً روی فیبرهای توری براگ انجام می‌شود، استفاده از آنها برای تولید پالس‌هایی با پهنای باند زیاد می‌باشد [۲۳]. برای تولید چنین پالس‌هایی یک نور لیزر را توسط یک پالس با طول موج متفاوت در محیطی مانند فیبر با آثار غیرخطی زیاد مدولاسیون فاز می‌کنند. سپس مدولاسیون فاز را به مدولاسیون شدت تبدیل کرده و بجای استفاده از فیبری به طول ۲۵km از فیبر توری براگ استفاده می‌شود. در نهایت با انتخاب حامل نوری مدوله شده فاز در شیب‌های مختلف طیف انعکاسی فیبرهای توری براگ می‌توان به پالس‌های تکی و یا دوتایی دست پیدا کرد.

لیزرهای چندمدی به عنوان منابع نور چندمدی و همچنین مورد استفاده در سیستم‌های مخابرات نوری و صنعت از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. یکی از المان‌های اساسی این نوع لیزرها، توری‌های براگ است. به عنوان مثال برای تولید لیزر با چندمد در بعضی موارد از تعدادی توری به صورت سری استفاده می‌شود [۲۴]. از کاربرد دیگر توری‌ها بررسی دینامیک و پلاریزاسیون آنها و کاربردشان در تولید سالیتون‌های براگ می‌باشد. در مرجع [۲۵] انواع سالیتون‌های براگ بصورت برداری و مشخصات پایداری آنها در محیط‌های تناوبی، همچنین پلاریزاسیون خطی و بیضوی آنها در حالی در محیطی تناوبی قرار دارند مورد بحث قرار گرفته‌اند. در این مرجع دو نوع ناپایداری پلاریزاسیون برای سیستم‌ها بیان شده است: یکی انتقال تشعشعات رادیویی در محیط‌های غیر سالیتونی و دیگری نقل و انتقال انرژی بین دو جزء سالیتون می‌باشد. در مرجع [۲۶] نیز پدیده مدولاسیون و طیف‌گین وابسته به آن در فیبرهای براگ برای تولید پالس‌های نوری بسیار کوتاه بحث می‌شود. در این آنالیز به بررسی دقیق ناپایداری مدولاسیون در غیاب اثر کر پرداخته می‌شود. همچنین در این تحقیق سالیتون‌های براگ از طیف‌گین مدولاسیون و در نزدیکی شکاف باند ساختارهای باند ممنوعه بدست می‌آیند. به عبارتی دیگر سالیتون‌های براگ در محیط‌های غیر خطی و تناوبی از آثار غیرخطی و ناپایداری مدولاسیون در توری‌های براگ حاصل می‌شوند.

سالیتون ها نیز از مباحث مهمی در مخابرات نوری است. در سال ۲۰۰۴ آقای مالومد و همکارانش پایداری حرکت سالیتون ها را در فیبر های توری براگ را با حل معادلات تزویج شده آنها در حالت یک بعدی برای یک سطح موجبری مورد بررسی قرار داد [۲۷]. طبق این بررسی وقتی طیف سیستم شامل باند ممنوعه درستی نباشد هرگز سالیتون ها نمی توانند در آن حرکت نمایند. در حقیقت سالیتون هایی که با سرعت کمتر از نصف ماکزیمم سرعت گروه حرکت نمایند امکان انتقال برای آنها وجود ندارد و مکان هایی که سالیتون ها پایدار هستند وابسته به پارامتر های توری ها می باشد. برای تولید پالس های سالیTONی [۲۸] نیز می توان از لیزر های مد قفل شده استفاده کرد. در این لیزر ها نیز برای عمل قفل شدگی^۱ از توری ها استفاده می شود [۲۹-۳۰].

پالس های بسیار کوچک نیز بخاطر ویژگی های منحصر به فرد در مخابرات زیاد استفاده می شوند. این پالس ها توسط فشرده ساز های پالس به روش های مختلفی از جمله استفاده از سالیتون ها ساخته می شوند [۳۱]. ولی اگر در تولید پالس های باریک از توری های براگ استفاده کنیم [۳۲]، از آنجا که مقدار پاشیدگی موجود در این فیبر ها بسیار بالا است، (درجه های ششم از پاشیدگی در آنها وجود دارد) می توان سالیتون ها را در آنها اعمال کرد و با بررسی دینامیک آنها در طول حدود ۶cm پالس های کوچک تولید نمود. همچنین در مرجع [۳۳] نشان داده شده است که اگر تغییرات پاشیدگی بصورت نمایی کاهش یابد عمل فشرده سازی با بازده بیشتر انجام می شود.

از دیگر قابلیت های مهم دیگر توری های براگ به خصوص توری های براگ دوره تناوب طولانی استفاده از آنها در ساخت سنسور است، ساختار این نوع توری براگ به گونه ای است که نسبت به تغییر پارامترهای فیزیکی اعمال شده به آن حساسیت زیادی نشان میدهد، این شرایط فیزیکی بر ضریب شکست هسته و همچنین فواصل بین توری ها تاثیر می گذارد و این تغییرات بر انتشار پالس های نوری در فیبر توری براگ اثر می گذارد، بر خلاف فیبر های توری براگ دوره تناوب کوتاه که پالس نوری تنها در هسته فیبر منتشر می شود در این نوع توری براگ پالس نوری علاوه بر اینکه در هسته فیبر توری براگ منتشر در پوشش هم منتشر می شود بنابراین شکل و ضریب شکست پوشش هم بر نحوه انتشار پالس های نوری اثر می گذارد زیرا سرعت و پروفایل انتشار پالس های نوری در هسته و پوشش با یک دیگر متفاوت است. در این نوع فیبر های توری براگ تزویج بین دو مد هم جهت در هسته و پوشش صورت می گیرد. در این نوع توری های براگ هم یکی از عوامل مخرب شکل پالس های نوری پاشیدگی است که می توان با چیرپ کردن هسته توری براگ دوره تناوب بلند می توان اثر آن را جبران کرد [۳۴-۴۰].

لذا همانطور که در بالا مقدمه ای از فیبر های توری براگ گفته شد این المان ها بسیار با اهمیت هستند. بنابراین بررسی انتشار پالس در آنها و مطالعه اثرات غیر خطی اعمالی آنها بر روی پالس انتشار یافته از اهمیت خاصی برخوردار است. به همین دلیل در این پایان نامه الگوریتم عددی جدید برای حل معادلات تزویج شده توری ها را ارائه کرده و اثر پاشیدگی و غیر خطی را در آنها بررسی کرده ایم.

¹ Locking

فصل دوم
تئوری فیبرهای توری براگ و
اثر چیرپ

فیبرهای توری براگ از جمله وسایل اپتیکی بوده که در تجهیزات و مخابرات نوری کاربرد فراوانی دارند. با اعمال اثر چیرپ بر ساختار فیبرهای توری براگ قابلیت های این ابزارها دو چندان شده و کنترل و هدایت پالس های نوری درون آنها افزایش چشمگیری می یابد توری های چیرپ شده کاربردهای زیادی دارند به ویژه توری براگ با چیرپ خطی که جایگاه ویژه ای در اپتیک به عنوان اصلاح کننده و جبران کننده پاشیدگی دارد. این کاربرد موجب شده که خطوط انتقال با پهنای باند وسیع، کیفیت بالا و بسیار طولانی با نرخ انتقال بیت بیشتر از ۴۰ Gb/sec در ۱۰۰ کیلومتر یا بیشتر داشته باشیم [۴۱]. از دیگر قابلیت های چیرپ می توان به فشرده کردن یا گسترده کردن پالس های نوری، تقویت کننده پالس نوری، فیلترهای میانگذر و میان نگذر و استفاده در سنسورها اشاره کرد [۴۲-۴۴]. در توری های براگ چیرپ شده ضریب شکست هسته در امتداد طول فیبر تغییر می کند که موجب می شود پالس نوری منعکس شده، طول موج های متفاوتی را تجربه کند.

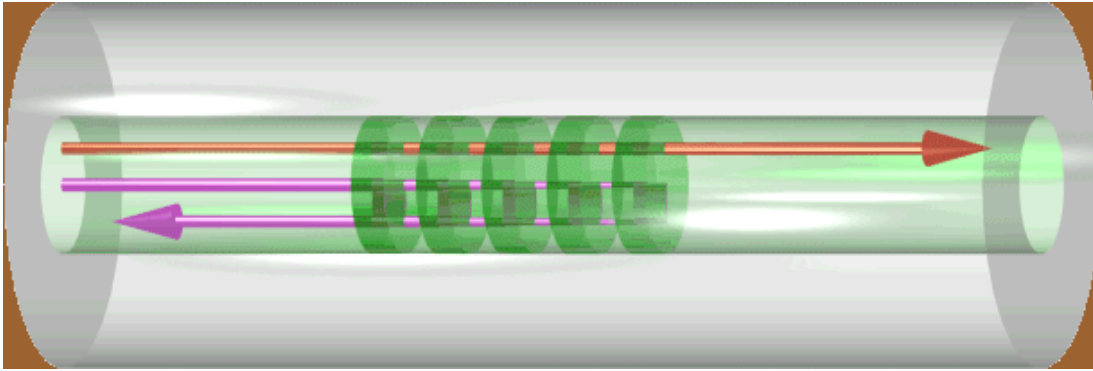
اثر پاشیدگی نور و قانون براگ: هرگاه نور با زاویه θ_i به یک محیط برخورد نماید قسمتی از آن با زاویه θ_r انعکاس و مابقی در محیط انتشار پیدا می کنند و زاویه تابش و با تابش زیر برقرار است:

$$\sin \theta_i - \sin \theta_r = m\lambda / (n\Lambda) \quad (۱-۲)$$

که در این معادله Λ دوره تناوب توری و m مرتبه انعکاس براگ می باشد. این شرط را می توان از شرط تطبیق فاز^۱ استخراج کرده که معمولاً در تقویت کننده های بریلیومی و در پدیده FWM ^۲ اتفاق می افتد. شکل ۱-۲ توری یکنواختی را نشان می دهد که ضریب شکست در طول آن به صورت دوره تناوبی تغییر می کند. اگر شرط تطبیق فاز برقرار شود و زاویه ورودی به طور عمود به فیبر توری براگ برخورد کند موج انعکاسی دارای زاویه $-\pi/2$ خواهد بود و معادله شرط براگ یعنی $\lambda = 2n\Lambda$ برقرار خواهد بود.

^۱ Phase-Matching

^۲ Four Wave Mixing



شکل ۱-۲ شکل یک فیبر توری براگ که فلش ها نشان دهنده موجهای رفت و برگشت می باشد

۲-۲ حساسیت نسبت به فوتون ها

در ساخت فیبرهای نوری معمولاً از سیلیکایی استفاده می شود که با ژرمانیوم با غلظت حدود ۳ تا ۵٪ ناخالص شده است زیرا باید هسته فیبر نوری از ضریب شکست بیشتری نسبت به لایه پوششی فیبر برخوردار باشد. وجود اتم های ژرمانیوم در داخل هسته فیبر نوری باعث ایجاد پیوندهای اکسیژنی نقص دار (از قبیل پیوندهای $Si-Ge$ و $Ge-Ge$) شده و در شبکه سیلیکا به عنوان یک نقص عمل می کند. معمولاً انرژی این نوع پیوند حدود 5^{ev} است. هنگامی که نور لیزر به فیبر نوری برخورد می کند به علت جذب یک فوتونی در 244^{nm} و یا جذب دو فوتونی در 488^{nm} این پیوندها شکسته شده و مراکز باند انرژی ژرمانیوم را به وجود می آورند. الکترون های اضافی در مراکز باند انرژی ژرمانیوم به راحتی می توانند در شبکه سیلیکا حرکت کرده و به وسیله تله های حفره ای در داخل شبکه سیلیکا به دام افتند. این تغییرات در داخل شبکه میزان ضریب جذب را داخل فیبر نوری یعنی $\alpha(\omega)$ را تغییر می دهند. همچنین تغییرات در ضریب جذب باعث تأثیرگذاری بر روی ضریب شکست نیز می شود.

حال هنگامی که اشعه ماورابنفش به فیبر برخورد کند از آنجا که میزان جذب اتم های ژرمانیوم در منطقه ماوراء بنفش صورت می گیرد در نتیجه در این منطقه نیز ضریب شکست تغییر می کند. لذا تغییر در ضریب شکست فقط در منطقه هسته فیبر اتفاق می افتد و در حقیقت یک تغییرات تناوبی نیز صورت می گیرد. به عنوان مثال برای فیبرهای معمولی در طول موج $1/3-1/6^{um}$ تغییر ضریب شکست حدود $10^{-4} \sim \Delta n$ بوده در صورتی که برای غلظت های بیشتر ژرمانیوم این مقدار به $10^{-4} \times 10$ نیز خواهد رسید [۴۵]. برای ناخالص سازی و افزایش ضریب شکست علاوه بر ژرمانیوم می توان از مواد دیگر نیز استفاده کرد. به عنوان مثال می توان فیبر را در گاز هیدروژن خیساند و هنگامی که اشعه ماوراء بنفش استفاده می کنیم اتم های ژرمانیوم بهتر با اکسیژن ترکیب شده و از آنجا که میزان ناخالصی Geo بیشتر می شود باعث افزایش تغییرات ضریب شکست یا Δn خواهد شد.