



دانشگاه صنعتی شیراز  
دانشکده برق و الکترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در مهندسی الکترونیک

عنوان :

**بررسی انتشار پالس در فیبرهای توری براگ غیرخطی**

توسط :

**امیر حسین جعفری**

استاد راهنما:

**فرزین امامی**

اساتید مشاور :

**محسن حاتمی**

**محمد رضا صالحی**

شهریورماه ۱۳۸۷



دانشگاه صنعتی شیراز  
دانشکده برق و الکترونیک

## بررسی انتشار پالس در فیبر های توری براگ غیر خطی

به وسیله ی :

**امیر حسین جعفری**

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم  
برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته ی :

**مهندسی برق و الکترونیک**

از دانشگاه صنعتی شیراز

شیراز

جمهوری اسلامی ایران

ارزیابی شده توسط کمیته پایان نامه با درجه : عالی

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

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

.....دکتر محمد رضا صالحی، استادیار دانشکده برق و الکترونیک(استاد مشاور)

.....دکتر مسعود محزون، استادیار دانشکده برق و الکترونیک(داور)

شهریورماه ۱۳۸۷

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی  
آنانکه وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است  
آنانکه فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه های جاودانی زندگی من است  
به پاس قلب های بزرگشان که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید  
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

امیر حسین جعفری

شهریور ۱۳۸

سپاسگزاری:

اکنون که این رساله به حول و قوه الهی پایان رسیده است بر خود فرض می دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر امامی که در تمام مراحل پایان نامه با راهنمایی های خود راهگشای اینجانب بوده اند اینجانب را همراهی کردند تشکر فراوان نمایم. ضمناً از اساتید گرانقدر و ارجمند جناب آقای دکتر حاتمی و جناب آقای دکتر صالحی نیز که در این پایان نامه من را یاری رساندند تشکر و سپاسگزاری می نمایم.

## چکیده

### بررسی انتشار پالس در فیبر های توری براگ غیرخطی

به وسیله ی :

امیر حسین جعفری

## چکیده

در این رساله توانستیم با حل معادلات حاکم بر توری های براگ به روش سری فوریه و با استفاده از تکرار گوس سایدل انتشار پالس را بطور کامل و همراه تمام آثار غیر خطی را بررسی کنیم. تا بحال این معادلات حل نشده بود و فقط بعضی جواب های سالیتمونی آن با فرضیات ساده سازی ارائه شده بود. از جمله نکات موجود در این معادلات اینست که را نمی توانستیم فقط از روش سری فوریه برای حل این معادلات استفاده کرد زیرا این روش برای حل معادلات با شرایط اولیه مفید بوده در صورتی که معادلات ما از نوع شرایط مرزی استطی حل این معادلات نشان دادیم که توری های براگ دارای پاشیدگی خیلی زیادی بوده و پالسی که در فیبر معمولی در طول ۵۰ کیلومتر پهن می شود در این وسیله ها با طول چند میلیمتر به همان اندازه پهن می شود. همچنین نشان دادیم که وجود پاشیدگی مرتبه اول باعث جابجایی زمانی در قله پالس ورودی شده و با توجه به به علامت آن به سمت چپ و راست شیفت می یابد. در نهایت نشان دادیم که در دامنه های کم اثرات غیرخطی قابل چشم پوشی بوده و تاثیری در حالت فیلتری توری ها ندارد ولی با افزایش دامنه سالیتمون ورودی دیده می شود که فرکانس براگ به علت اثر کر جابجا شده و فرکانس مرکزی پالس دیگر در باند ممنوعه قرار نمی گیرد و در نهایت پالس از فیبر عبور کرده و اثر کلیدزنی در توری های براگ ایجاد می شود که این اثر نیز با افزایش دامنه افزایش می یابد.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول - مقدمه
۵	فصل دوم - تئوری فیبرهای توری براگ
۶	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ حساسیت نسبت به فوتون ها
۷	۳-۲ تئوری مد های تزویج شده
۹	۱-۳-۲ : بررسی معادلات مد تزویج شده برای تمام مدها در حالت خطی و بدون ترم زمانی
۱۰	۲-۳-۲ معادلات تزویج شده غیر خطی با ترم زمانی
۱۲	۴-۲ روش های شبیه سازی فیبرهای توری براگ
۱۳	۱-۴-۲ روش ماتریس انتقال
۱۷	۲-۴-۲ روش آنالیز عددی فیبر نوری براگ به روش چند لایه ای
۱۷	۱-۲-۴-۲ روش روآرد
۱۷	۲-۲-۴-۲ روش لایه نازک پشته‌ای
۱۹	۳-۴-۲ روش ترینگ
۲۲	۵-۲ حل خطی معادلات تزویج شده
۲۴	۶-۲ باند ممنوعه فوتونی یا باند توقف
۲۶	۷-۲ فیبر توری براگ به عنوان فیلتر نوری
۲۷	۸-۲ سالیتون های براگ
۲۸	۱-۸-۲ شکل گرفتن سالیتون های براگ
۳۱	فصل سوم - روش های ساخت توری های براگ
۳۲	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ تداخل سنج بدنه ای
۳۳	۳-۳ روش ماسک فاز
۳۵	۴-۳ ساخت ماسک فاز
۳۵	۵-۳ تداخل سنج ماسک فاز
۳۸	۶-۳ توری شیب شده
۴۰	۷-۳ تداخل سنج ماسک فاز جاروب کننده
۴۱	۸-۳ تداخل سنج آئینه و منشور تا شده
۴۲	۹-۳ نوشتن نقطه به نقطه
۴۳	۱۰-۳ توری های چیرب شده
۴۵	۱۱-۳ ساخت توری های چیرب شده پله ای

۴۷	فصل چهارم - کاربردهای فیبر توری براگ
۴۸	۱-۴ کاربرد فیبرهای توری براگ در حسگرها
۴۸	۱-۱-۴ تئوری حسگرها از نوع توری براگ
۵۲	۲-۱-۴ کاربرد عملی توری براگ در حسگرها :
۵۳	۱-۲-۱-۴ طراحی حسگر با استفاده از یک فیبر توری براگ یکنواخت
۵۵	۲-۲-۱-۴ طراحی حسگر با استفاده از $N$ فیبر توری براگ یکنواخت
۵۸	۳-۲-۱-۴ طراحی حسگر با استفاده از فیبر توری براگ چرپ شده :
۶۰	۲-۴ کاربرد فیبر توری براگ در فیلترهای نوری
۶۱	۱-۲-۴ فیلترهای توری های براگ با فیدبک توزیع شده
۶۳	۲-۲-۴ فیلتر تداخل سنج مایکلسون
۶۵	۳-۲-۴ فیلترهای میان گذر توری از نوع پله‌ای
۶۶	۴-۲-۴ فیلتر نوری میان‌گذر بوسیله توری براگ با پهنای طیف قابل تنظیم و بدون پاشیدگی
۶۸	۳-۴ کاربرد فیبرهای توری براگ در ساخت لیزرها
۶۹	۱-۳-۴ کاربرد توری های براگ در لیزر حلقه ای با سه طول موج
۷۱	۲-۳-۴ لیزر از نوع $Q$ -switched بر اساس مدولاسیون توری های براگ
۷۲	۳-۳-۴ لیزر $DFB$ با دو طول موج
۲۶	فصل پنجم - الگوریتم عددی و نتایج شبیه سازی
۷۵	۱-۵ مقدمه
۷۶	۲-۵ بررسی اثر شبه پالس روی فیبرهای توری براگ غیرخطی
۸۲	۳-۵ انتشار پالس در فیبرهای توری براگ غیرخطی به روش سری فوریه
۸۳	۴-۵ نتایج شبیه سازی عددی
۹۷	نتیجه گیری
۹۸	مراجع

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۶	شکل ۱-۲ شکل یک فیبر توری براگ با فلش های سیاه نشان دهنده موجهای رفت و برگشت
۸	شکل ۲-۲ دیاگرام انتشار پالس نوری با طیف پهن در یک فیبر توری براگ
۹	شکل ۳-۲ طیف انتقال و انعکاس یک فیبر توری براگ
۱۳	شکل ۴-۲ تغییرات ضریب شکست در هسته فیبر و میدانها در ابتدای فیبر و انتهای آن
۱۵	شکل ۵-۲ آنالیز توری براگ با قسمت کردن آن به تکه های کوچکتر در روش ماتریس انتقال
۱۶	شکل ۶-۲ تغییرات ضریب شکست در تکه ای از فیبر توری براگ برای دو میدان هم جهت
۲۲	شکل ۸-۲ شدت موج برگشت به موج رفت و میزان پهنای پالس نسبت به سرعت انتشار
۲۲	شکل ۹-۲ محاسبه شدت های الف) $ e_1 ^2$ ب) $ e_2 ^2$ با استفاده از معادلات حل شده
۲۳	شکل ۱۰-۲ منحنی پاشیدگی و باند ممنوعه برای فیبر توری براگ
۲۶	شکل ۱۱-۲ پاشیدگی اعمالی توسط فیبر توری براگ برای مقادیر مختلف $\delta$ و $K$
۲۷	شکل ۱۲-۲ الف) ضریب انعکاس $ r_g ^2$ ب) فاز $r_g$ که به عنوان تابعی از $\delta$ برای دو مقدار $Kl$
۲۹	شکل ۱۳-۲ شکل پالس های خروجی برای مقادیر مختلف $\delta$ وقتی پالس هایی با توان $11 \text{ GW/cm}^2$
۲۹	شکل ۱۴-۲ تغییر پهنای پالس در توان های بالا
۳۳	شکل ۱-۳ استفاده از اشعه ماورا بنفش برای ایجاد توری در فیبر های نوری
۳۴	شکل ۲-۳ شماتیک انکسار اشعه ماورابنفش هنگام برخورد با ماسک فاز
۳۴	شکل ۳-۳ اشعه ماورابنفش هنگام برخورد با ماسک فاز به مؤلفه های با مراتب ۱ ، ۱-
۳۶	شکل ۴-۳ استفاده از ماسک فاز به عنوان جداکننده اشعه برای نوشتن توری ها در فیبر
۳۶	شکل ۵-۳ طول موج براگ منحنی خط چین و همچنین نرخ تغییرات طول موج براگ
۳۷	شکل ۶-۳ 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.
۳۸	شکل ۷-۳ جایگذاری بلوک سیلیکا به جای دو آینه انعکاس دهنده
۳۹	شکل ۸-۳ ا) شیارها و توری های ایجاد شده برای یک توری کج شده (b) ایجاد توری کج شده با استفاده از آینه
۴۰	شکل ۹-۳ میزان همپوشانی دو اشعه که در برخورد با یکدیگر و درست کردن شیارهایی الماسی
۴۰	شکل ۱۰-۳ : روش اسکن کردن ماسک فاز برای بدست آوردن توری با طول زیاد.
۴۱	شکل ۱۱-۳: تداخل سنج آینه ای Lloyd
۴۲	شکل ۱۲-۳: تداخل سنج به وسیله منشور Lloyd
۴۲	شکل ۱۳-۳: طول نرمالیزه شده توری نسبت به پهنای اشعه برحسب زاویه رأس منشور
۴۳	شکل ۱۴-۳: ایجاد توری ها در فیبر با روش نقطه به نقطه
۴۳	شکل ۱۵-۳: ایجاد توری چیرپ شده به وسیله خم کردن فیبر



- شکل ۳-۱۶: یک فیبر خم شده با شعاع R
- شکل ۳-۱۷: ایجاد توری چیرپ شده به وسیله دو لنز با فاصله کانونی مختلف
- شکل ۳-۱۸: ماسک فاز step-chirped
- شکل ۴-۱: دیاگرام میزان کاربرد فیبر های براگ در ساخت حسگر های نوری
- شکل ۴-۲: اثر پلاریزاسیون و انکسار مضاعف در فیبر توری براگ
- شکل ۴-۳: یک فیبر توری براگ هنگامی که نیروی خطی بر آن وارد می شود
- شکل ۴-۴: توزیع فضایی ضریب شکست در طول محور فیبر توری به طول  $L=10^3 \text{mm}$
- شکل ۴-۵: طول موج براگ با افزایش نیرو به سمت طول موج های بالاتر می رود.
- ۴-۶: جابجایی طیف انعکاس به علت اعمال فشار به توری براگ
- شکل ۴-۷: ساختار یک ترمومتر با رنج وسیع دمایی
- شکل ۴-۸: توری مورد استفاده در حسگر دما
- شکل ۴-۹: جابجایی طول موج براگ به مقادیر بالاتر با افزایش دما
- شکل ۴-۱۰: توان ساطع شده از جسم سیاه بر حسب دما
- شکل ۴-۱۱: شماتیک آزمایشگاهی سیستم معرفی شده برای عمل اندازه گیری دما
- شکل ۴-۱۲: تغییرات در طیف انعکاس فیبر توری براگ بر اثر افزایش دما.
- شکل ۴-۱۳: شبیه سازی توان نور بر حسب دما برای دو کانال مجاور
- شکل ۴-۱۴: شماتیک یک حسگر با استفاده از فیبر توری چرب شده و یک فیبر توری یکنواخت
- شکل ۴-۱۵: پاسخ فاز سیستم ارائه شده که شیفت فاز بر حسب طول موج
- شکل ۴-۱۵: تغییر فاز به عنوان تابعی از کشش در فرکانس مدولاسیون ۲GHZ.
- شکل ۴-۱۶: توری از نوع فیدبک توزیع شده در کاربرد فیلتر میان گذر
- شکل ۴-۱۷: طیف انتقال محاسبه شده برای توری با فیدبک توزیع شده (DFB)
- شکل ۴-۱۸: شماتیک سری یک فیلتر با فیدبک توزیع شده و با جابجایی فازهای  $\pi/2$
- شکل ۴-۱۹: طیف انتقال فیلتر با دو جابجایی فاز  $1^{\text{mm}}$  و ضریب شکست با عمق مدولاسیون  $10^{-3}$
- شکل ۴-۲۰: یک فیلتر از نوع کوپلر با توری در یکی از بازوهای آن
- شکل ۴-۲۱: فیلتر میان گذر و عبور ۱۰۰٪ پالس در طول موج براگ از پورت ۲
- شکل ۴-۲۲: انعکاس و تابش نور از هسته فیبر توری به سمت خارج از آن
- شکل ۴-۲۳: طیف تلفات انتقال (انعکاس) فیبر توری براگ نوع کج شده
- شکل ۴-۲۴: شماتیک فیلتر ارائه شده میانگذر، بدون دسپرشن و قابل تنظیم.

- شکل ۴-۲۵ طیف انعکاس دو توری براگ چرب شده ۶۷
- شکل ۴-۲۶ طیف انعکاس فیلتر طراحی شده ۶۷
- شکل ۴-۲۷ دیاگرام فیلتر ارائه شده که از توری براگ ۶۹
- شکل ۴-۲۸ دیاگرام فیلتر ارائه شده که از توری براگ دو جابجایی فاز ۶۹
- شکل ۴-۲۹ دیاگرام لیزر حلقه ای طراحی شده توسط فیلتر توری براگ با سه باند عبور باریک. ۷۰
- شکل ۴-۳۰ طیف خروجی لیزر حلقه ای طراحی شده در سه طول موج ۷۰
- شکل ۴-۳۱ لیزر تمام فیبر از نوع  $Q$ -switched ۷۱
- شکل ۴-۳۲ نمودار سمت راست پاسخ زمانی فیلتر همراه مدولاتور ۷۱
- شکل ۴-۳۳ دیاگرام فضایی توری براگ طراحی شده به عنوان کویتی لیزر  $DFB$  با ساختار متقارن ۷۲
- شکل ۴-۳۴ طیف انتقال توری طراحی شده با ۲ باند عبور در مرکز باند قطع ۷۳
- شکل ۴-۳۵ توان خروجی هر طول موج لیزر نسبت به توان ورودی و پاسخ زمانی لیزر در دو طول موج ۷۳
- شکل ۵-۱ الگوریتم عددی ارائه شده برای حل معادلات غیر خطی فیبرهای توری براگ در حالت شبه پالس ۷۷
- شکل ۵-۲ شبیه سازی انتشار پالس در طول توری به روش عددی بیان شده برای  $\delta < \kappa$ . ۷۸
- شکل ۵-۳ شبیه سازی انتشار پالس در طول توری به روش عددی بیان شده برای  $\delta > \kappa$  ۷۹
- شکل ۵-۴ افزایش مقدار انرژی میدان های رفت و برگشت برای حالت  $\delta < \kappa$ ، ۸۰
- شکل ۵-۵ ترسیم دامنه امواج رفت و برگشت برای  $\delta < \kappa$  و یک ورودی نرمالیزه (با شدت کم). ۸۱
- شکل ۵-۶ افزایش مقدار انرژی میدان های رفت و برگشتی برای حالت  $\delta < \kappa$  ۸۱
- شکل ۵-۸ شبیه سازی انتشار پالس سالیوتونی در فیبر توری براگ برای طول موج مرکزی پالس خارج باند ممنوعه ۸۴
- شکل ۵-۹ کاهش دوره تناوب سالیوتون ها با کاهش  $\delta$  در حین انتشار ۸۵
- شکل ۵-۱۰ شبیه سازی انتشار پالس در فیبر توری براگ یکنواخت به روش سری فوریه برای  $\delta < \kappa$ . ۸۶
- شکل ۵-۱۱ شبیه سازی انتشار پالس در توری براگ برای بررسی اثر  $\beta_2$  به روش عددی بیان شده برای  $\delta < \kappa$  ۸۷
- شکل ۵-۱۲ بررسی اثر افزایش  $\beta_2$  بر روی پالس انتشار یافته در توری براگ در حالت  $\delta < \kappa$ . ۸۸
- شکل ۵-۱۳ پهن شدن پالس و کاهش دامنه نوسان سالیوتون ها بر اثر  $\beta_2$  برای  $\delta > \kappa$ . ۸۹
- شکل ۵-۱۴ اثر پاشندگی مرتبه اول مثبت بر روی پالس منتشره از توری براگ ۹۰
- شکل ۵-۱۵ اثر پاشندگی مرتبه اول منفی بر روی پالس منتشره در فیبر توری براگ ۹۱
- شکل ۵-۱۶ انتشار سالیوتون با در نظر گرفتن پاشندگی مرتبه دوم و برای مقادیر مثبت  $\beta_1$ . ۹۲
- شکل ۵-۱۷ تغییر دامنه پالس ورودی با افزایش ضریب شکست افتد ۹۳
- شکل ۵-۱۸  $P_{out} / P_{in}$  بر حسب توان پالس ورودی ۹۴
- شکل ۵-۱۹ افزایش بیشتر دامنه پالس ورودی و ایجاد اثر کلید زنی و تجزیه شدن پالس برگشتی ۹۵
- شکل ۵-۲۰ باریک شدن پالس ورودی ناشی از اثرات  $SPM$  و  $XPM$  ۹۶

# فصل اول

## مقدمه :

فیبرهای توری براگ از جمله المان های مهم در سیستم های مخابرات فیبر نوری محسوب شده و امروزه توجه زیادی به آنها می شود. این نوع فیبرهای در حدود ۳۰ سال پیش توسط شخصی به نام آقای هیل<sup>۱</sup> در کانادا مطرح شد. در این فیبرها هسته فیبر دارای ضریب شکست تناوبی بوده که باعث ایجاد آثار غیر خطی و بعضی از رفتارها در این فیبرها می شود. فیبرهای توری براگ دارای کاربرد های فراوانی در طراحی المان های نوری از جمله سوئیچ های نوری، فیلتر های نوری، جبران کننده های پاشیدگی<sup>۲</sup> و لیزرها می باشند [۳-۱].

یکی از قابلیت های فیبرهای توری براگ استفاده در جبران کننده های پاشیدگی می باشد. به علت وابسته بودن پاشیدگی به طول موج، سیگنالها با طول موج های مختلف در مقابل خود پاشیدگی های مختلفی می بینند. بنابراین استفاده تنها از فیبرهای جبران کننده پاشیدگی<sup>۳</sup> برای جبران پاشیدگی کافی نبوده و نمی تواند بطور مساوی تمام کانالها را عاری از پاشیدگی نماید. یک راه حل ساده استفاده از دو فیبر *DCF* بطور موازی بوده که این روش بخاطر تلفات زیاد در کوپلرها و همچنین ایده آل نبودن فیلترهای مورد استفاده تلفات زیادی دارد [۴]. برای حل این مشکل می توان از روش گفته شده در مرجع [۵] استفاده نمود. در این روش توری های براگ با فرکانس مرکزی مختلف به عنوان فیلتر میان گذر عمل می کنند و می توان آنها را درون فیبرهای *DCF* قرار داد که باعث انعکاس سیگنال های کانال های مختلف می شود. بنابراین هر کانال طول خاصی از فیبر *DCF* را طی می کند و بعد توسط یک توری معین انعکاس می یابد که در نهایت پاشیدگی تمام کانالها بطور یکسان جبران می گردد.

ساختارهای دیگری برای جبران پاشیدگی با استفاده از توری ارائه شده است. 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 مسیرهای مختلفی را در طول فیبر طی می کنند و در نهایت همه آنها یک پاشیدگی را تجربه می کنند [۲ و ۶]. به عبارتی دیگر جدا از خاصیت انعکاسی، توریها نیز باعث ایجاد پاشیدگی مثبت و یا منفی در خطوط انتقال شده و می توان مقدار آن کم و یا زیاد کرد [۶، ۲]. البته می توان از فیبرهای توری چیرپ<sup>۴</sup> شده نیز در جبران کننده های پاشیدگی استفاده کرد. در این کاربرد از خاصیت 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. در این کاربرد (جبران کننده پاشیدگی) خاصیت انعکاسی توریها در فیبر به عنوان یک خاصیت مزاحم عمل می کند. پاشیدگی موجود در فیبرهای توری براگ همچنین باعث تغییر در پروسه های غیر خطی تبدیل فرکانس از قبیل تولید هارمونیک های مرتبه دوم [۷-۱۲]، آمپلی فایرهای پارامتری (بر حسب  $\chi^2$  و  $\chi^3$  سوسپیتیلیتی غیر خطی) [۱۵-۱۳] می شود.

در توری های براگ به علت وابستگی ضریب شکست به شدت پالس ورودی، آثار غیر خطی در توریها ایجاد شده که از این خاصیت می توان در کلیدهای نوری فراهم استفاده کرد. عمل کلیدزنی با استفاده از یک پمپ نوری و آثار غیر خطی

<sup>1</sup> Hill

<sup>2</sup> Dispersion

<sup>3</sup> Dispersion compensation fibers(DCF)

<sup>4</sup> Chirped grating

[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<sup>۱</sup>، 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<sup>۲</sup> 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  $XPM$ <sup>۳</sup> 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 هریک و 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<sup>۴</sup> 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<sup>۵</sup> 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<sup>۶</sup> 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]. از جمله پدیده هایی که در سیستم های تناوبی اتفاق می افتد وجود باند های شکاف باند ممنوعه<sup>۷</sup> در طیف انتقال موج نوری می باشد [۲۲]. اگر فرکانس نور از مقدار تراز ممنوعه کمتر باشد نور در آن محیط نمی تواند انتشار یابد ولی اگر محیط دارای آثار غیر خطی باشد حتی اگر فرکانس نور کمتر از تراز ممنوعه باشد می تواند در آن محیط حرکت نماید. یکی از مثال های مهم در این زمینه سالیتون های براگ می باشند که می توانند با محیط های 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 توری های موجود در فیبر های معمولی فرق دارد: یکی عمق مدولاسیون و ضریب شکست آن که کاملا وابسته به فرکانس و دوم اثر جذب نور می باشد که باعث می شود لبه های تراز ممنوعه محو و نا مشخص گردد. از مزیت های استفاده از این محیط کم بودن توان مورد نیاز می باشد که علت اصلی آن اثر کر خیلی زیاد در محیط طراحی شده است.

از جمله مطالعات دیگر که اخیرا روی فیبر های توری براگ انجام می شود، استفاده از آنها برای تولید پالس هایی با پهنای باند زیاد می باشد [۲۳]. برای تولید چنین پالس هایی یک نور لیزر را توسط یک پالس با طول موج متفاوت در

<sup>1</sup> Kerr effect

<sup>2</sup> Bragg Solitons

<sup>3</sup> Cross phase modulation

<sup>4</sup> Coupler

<sup>5</sup> Hill

<sup>6</sup> Hill grating

<sup>7</sup> Forbidden bandgap

محیطی مانند فیبر با آثار غیرخطی زیاد مدولاسیون فاز می کنند. سپس مدولاسیون فاز را به مدولاسیون شدت تبدیل کرده و بجای استفاده از فیبری به طول ۲۵km از فیبر توری براگ استفاده می شود. در نهایت با انتخاب حامل نوری مدوله شده فاز در شیب های مختلف طیف انعکاسی فیبر های توری براگ می توان به پالس های تکی و یا دوتایی دست پیدا کرد.

لیزر های چند مدی به عنوان منابع نور چند مدی و همچنین مورد استفاده در سیستم های مخابرات نوری<sup>۱</sup> و صنعت از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. یکی از المان های اساسی این نوع لیزرها، توری های براگ است. به عنوان مثال برای تولید لیزر با چند مد در بعضی موارد از تعدادی توری به صورت سری استفاده می شود [۲۴].

از کاربرد دیگر توری ها بررسی دینامیک و پلاریزاسیون آنها و کاربردشان در تولید سالیتون های براگ می باشد. در مرجع [۲۵] انواع سالیتون های براگ بصورت برداری و مشخصات پایداری آنها در محیط های تناوبی، همچنین پلاریزاسیون خطی و بیضوی آنها در حالی در محیطی تناوبی قرار دارند مورد بحث قرار گرفته اند. در این مرجع دو نوع ناپایداری پلاریزاسیون برای سیستم ها بیان شده است: یکی انتقال تشعشعات رادیویی در محیط های غیر سالیتونی و دیگری نقل وانتقال انرژی بین دو جزء سالیتون می باشد. در مرجع [۲۶] نیز پدیده مدولاسیون و طیف گین وابسته به آن در فیبر های براگ برای تولید پالس های نوری بسیار کوتاه بحث می شود. در این آنالیز به بررسی دقیق ناپایداری مدولاسیون در غیاب اثر کر پرداخته می شود. همچنین در این تحقیق سالیتون های براگ از طیف گین مدولاسیون و در نزدیکی شکاف باند ساختار های باند ممنوعه<sup>۲</sup> بدست می آیند. به عبارتی دیگر سالیتون های براگ در محیط های غیر خطی و تناوبی از آثار غیر خطی و ناپایداری مدولاسیون در توری های براگ حاصل می شوند.

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 سالیتونی [۲۸] نیز می توان از لیزر های مد قفل شده استفاده کرد. در این لیزر ها نیز برای عمل قفل شدگی<sup>۳</sup> از توری ها استفاده می شود [۲۹-۳۰].

پالس های بسیار کوچک نیز بخاطر ویژگی های منحصر به فرد در مخابرات زیاد استفاده می شود. این پالس ها توسط فشرده ساز های پالس به روش های مختلفی از جمله استفاده از سالیتون ها [۳۱] ساخته می شوند. 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

---

<sup>1</sup> Wavelength division multiplexing (WDM)

<sup>2</sup> Bandgap

<sup>3</sup> Locking

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. 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 با استفاده از الگوریتم عددی جدید معادلات تزویج شده توری ها را ارائه کرده و انواع پاشیدگی و آثار غیر خطی را در آنها بررسی کرده ایم.

## فصل دوم

### تئوری فیبرهای توری براگ



## ۱-۲ مقدمه:

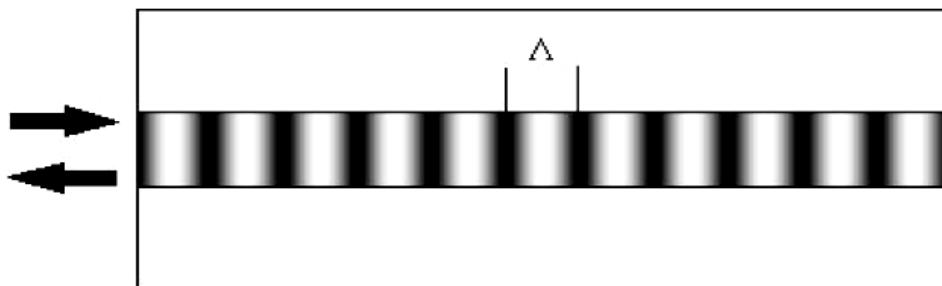
فیبرهای توری براگ از جمله وسایل اپتیکی بوده که در تجهیزات و مخابرات نوری کاربرد فراوانی دارند. از جمله کاربردهای آن می توان به کلید های نوری، اسپکترومترها و فیلترهای نوری اشاره کرد. در توری های براگ نور انکسار پیدا کرده و دامنه و فاز نور هنگام عبور از آن به صورت تناوبی تغییر می کند.

### اثر پریشیدگی نور و قانون براگ

هرگاه نور با زاویه  $\theta_i$  به یک محیط برخورد نماید قسمتی از آن با زاویه  $\theta_r$  انعکاس و مابقی در محیط انتشار پیدا می کنند و زاویه تابش و با تابش زیر برقرار است:

$$\sin \theta_i - \sin \theta_r = m\lambda / (n\Lambda) \quad (1-2)$$

که در این معادله  $\Lambda$  دوره تناوب توری و  $m$  مرتبه انعکاس براگ می باشد. این شرط را می توان از شرط تطبیق فاز<sup>۱</sup> استخراج کرده که معمولاً در تقویت کننده های بریلیومی و در پدیده<sup>۲</sup>  $FWM$  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.



شکل ۱-۲ شکل یک فیبر توری براگ که فلش های سیاه 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 رژمانیوم 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

<sup>1</sup> phase-matching

<sup>2</sup> Four wave mixing

لیزر به فیبر نوری برخورد می‌کند به علت جذب یک فوتونی در  $244\text{nm}$  و یا جذب دو فوتونی در  $488\text{nm}$  این پیوندها شکسته شده و مراکز باند انرژی ژرمانیوم را به وجود می‌آورند. الکترون های اضافی در مراکز باند انرژی ژرمانیوم به راحتی می‌توانند در شبکه سیلیکا حرکت کرده و به وسیله تله‌های حفره‌ای در داخل شبکه سیلیکا به دام افتند. این تغییرات در داخل شبکه میزان ضریب جذب را داخل فیبر نوری یعنی  $\alpha(\omega)$  را تغییر می‌دهند. همچنین تغییرات در ضریب جذب باعث تأثیرگذاری بر روی ضریب شکست نیز می‌شود.

حال هنگامی که اشعه ماورابنفش به فیبر برخورد کند از آنجا که میزان جذب اتم های ژرمانیوم در منطقه ماورابنفش صورت می‌گیرد در نتیجه در این منطقه نیز ضریب شکست تغییر می‌کند. لذا تغییر در ضریب شکست فقط در منطقه هسته فیبر اتفاق می‌افتد و در حقیقت یک تغییرات تناوبی نیز صورت می‌گیرد. به عنوان مثال برای فیبرهای معمولی در طول موج  $1.3-1.6\mu\text{m}$  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 [34]. برای ناخالص سازی و افزایش ضریب شکست علاوه بر ژرمانیوم می‌توان از مواد دیگر نیز استفاده کرد. به عنوان مثال می‌توان فیبر را در گاز هیدروژن خیساند و هنگامی که اشعه ماوراء بنفش استفاده می‌کنیم اتم های ژرمانیوم بهتر با اکسیژن ترکیب شده و از آنجا که میزان ناخالصی  $Geo$  بیشتر می‌شود باعث افزایش تغییرات ضریب شکست یا  $\Delta n$  خواهد شد.

$$\Delta n(\omega) = \frac{c}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Delta \alpha(\omega') d\omega'}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (2-2)$$

که در این معادله  $\Delta \alpha$  بیان کننده ضریب جذب و  $\Delta n$  به تغییرات ضریب شکست ناشی از ضریب جذب دارد. برای ساخت توری های قوی<sup>1</sup> باید تغییرات ضریب شکست در فیبر زیاد باشد لذا باید ضریب جذب ماده را نسبت به اشعه ماوراء بنفش افزایش داد که به موجب آن میزان تغییرات در ضریب شکست هسته فیبر بیشتر می‌شود.

### ۳-۲ تئوری مد های تزویج شده<sup>۲</sup>:

برای بررسی فیبرهای توری براگ معمولاً دو روش وجود دارد. روش اول: تئوری بلاچ<sup>۳</sup> که در این روش از حرکت الکترون‌ها در نیمه هادی سیلیکا [35] استفاده می‌شود و روش دوم: که در این روش با استفاده از این نکته که وجود توری ها در داخل فیبر باعث انعکاس موج در داخل فیبر می‌شود، فرض می‌کنیم در داخل فیبر توری براگ دو موج به صورت رفت و برگشت وجود داشته باشند و برای ایجاد ارتباط بین این دو موج، ضریب تزویج را تعریف می‌کنیم. این روش را با نام تئوری مد های تزویج شده می‌شناسیم. در اینجا ما با روش دوم فیبر های توری براگ را تحلیل می‌کنیم. برای بررسی چگونگی تئوری مدهای تزویج شده در یک محیطی که ضریب شکست بصورت تناوبی تغییر می‌کند، در ابتدا ضریب شکست را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

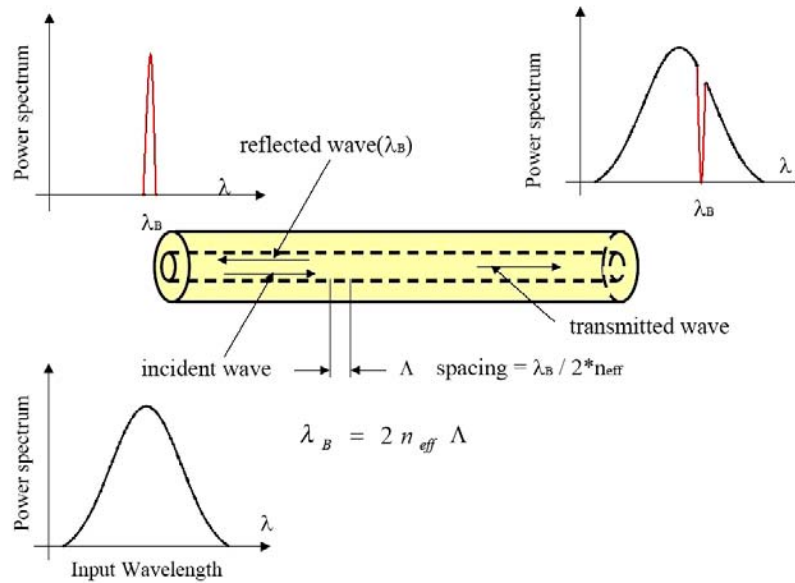
<sup>1</sup> Strong index grating

<sup>2</sup> Coupled mode theory

<sup>3</sup> Bloch theory

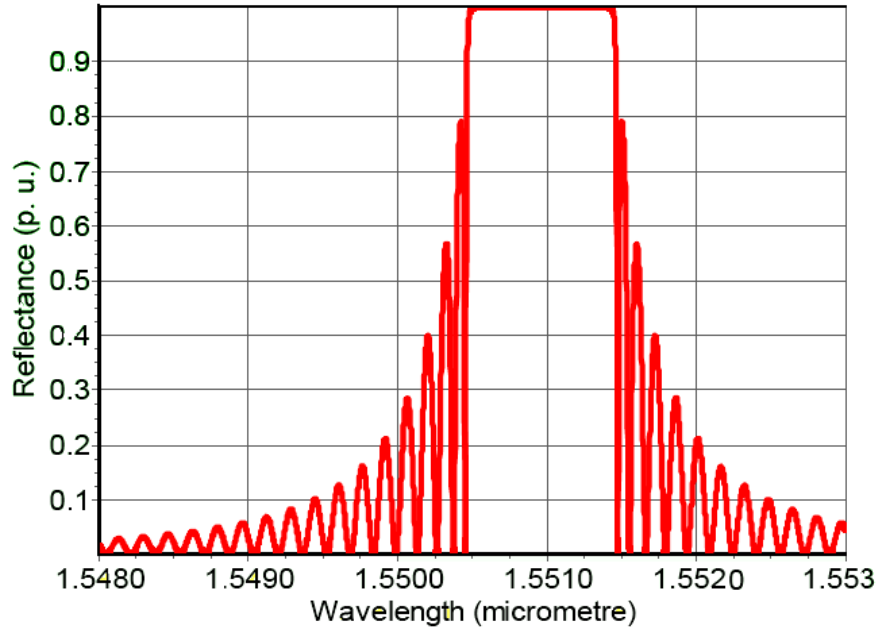
$$n(\omega, x, z) = \bar{n}(\omega, x, y, z) + n_2 |E|^2 + \delta n_g(x, y, z) \quad (3-2)$$

که در این معادله  $n(\omega, x, y, z)$  ضریب شکست متوسط هسته فیبر،  $\delta n(\omega, x, y, z)$  نیز ضریب شکست مدوله شده و  $\Lambda$  دوره تناوب براگ می باشد. در هر قسمت از تغییر ضریب شکست در فیبر توری مقدار کمی از نور برخوردی انعکاس می یابد. ولی اگر کل موج های انعکاسی از هر قسمت را با یکدیگر جمع کنیم یک موج انعکاسی بزرگ به صورت بازگشتی منعکس می شود. این موج برگشتی در طول موج خاصی بوده و از رابطه شرط براگ پیروی کرده و با نام طول موج براگ شناخته می شود. فقط آن طول موج هایی که در شرط براگ قرار می گیرند به طور کامل و قوی انعکاس یافته و بقیه طول موج ها انتقال می یابند. در شکل زیر دیاگرام انتشار طیف یک پالس را از یک فیبر حاوی توری نشان می دهد. همانطور که دیده می شود اگر یک پالس با طیف پهن از فیبر عبور کند فقط طول موج براگ انعکاس یافته و بقیه از فیبر عبور می کنند.



شکل ۲-۲ دیاگرام انتشار پالس نوری با طیف پهن در یک فیبر توری براگ

همچنین در شکل ۳ طیف انعکاس و انتقال را برای یک فیبر توری براگ با پارامترهای  $n_{eff} \approx 1/447$ ،  $L = 5 \text{ mm}$ ،  $\delta n = 1 \cdot 10^{-4}$  و  $\Lambda = 0.53559$  رسم شده است. دیده می شود که در طول موج براگ تمام موج انعکاس یافته ولی در بقیه طول موج دامنه طیف انعکاس کاهش می یابد.



شکل ۲-۳ طیف انتقال و انعکاس یک فیبر توری براگ.

در ابتدا معادلات تزویج شده را برای تمام مد ها و بدون ترم زمانی بیان کرده و سپس به بررسی و بدست آوردن معادلات در حثالت کلی تر با ترم زمانی و آثار غیر خطی می پردازیم.

### ۲-۳-۱ حالت اول: بررسی معادلات مد تزویج شده برای تمام مدها بدون آثار غیر خطی و بدون ترم زمانی:

در این حالت میدان الکتریکی در فیبر را بر حسب توابعی از X و Y به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$E_{\pm j}(x, y, z) = e_{\pm jt}(x, y) \exp(\pm i\beta_j z) \quad j=1,2,3,\dots \quad (۴-۲)$$

که در این معادله  $e_{\pm jt}(x, y)$  دامنه میدان الکتریکی انتشار یافته مد  $j$  ام بوده و  $\pm$  نیز به جهت انتشار و  $\beta_j$  به ثابت انتشار اشاره دارد. انتشار نور در درون فیبر توری براگ می تواند به صورت معادلات ماکسول بیان شود که در آن موج انتشاری را مجموع موج های رفت و برگشت مدل می کنیم [۳۶]:

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [E_j(x, y, z, t) + E_{-j}(x, y, z, t)] \quad (۵-۲)$$

اگر میدان های معادله ۲-۴ را در ۲-۵ جایگزین کنیم داریم:

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j^+(z) \exp(i\beta_j z) + A_j^-(z) \exp(-i\beta_j z)] \vec{e}_{jt}(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (۶-۲)$$