

بِسْمِ تَعَالَى



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده علوم

موضوع:

بررسی اثر بازتابنده براگ روی موج خروجی لیزرهای فیبر نوری
آلاییده به یون اربیوم

دانشجو:

زهرا اصلاحی

اساتید راهنما:

دکتر محسن صالح کوتاهی

دکتر فاطمه شهشهانی

بهمن ۱۳۹۰

چکیده

در این پایان نامه مدل سازی و تحلیل تئوری لیزرهای تار نوری آلاییده به یون اربیوم با بازتابنده های براگ انجام شده است. بازتابنده های نوری براگ از تارهایی با تغییرات تناوبی ضریب شکست در طول تار تشکیل شده اند. ضرایب بازتاب و عبور بازتابنده های نوری براگ به دامنه تغییرات تناوبی و طول فیبر بستگی دارد. با استفاده از بازتابنده براگ در لیزرهای فیبر نوری می توان بازتاب و فیدبک امواج نوری در دو انتهای لیزر را تامین و تنظیم نمود. به منظور تحلیل تاثیر بازتابنده براگ روی عملکرد لیزر تار نوری، ابتدا با حل معادلات موج کوپل شده با استفاده از روش ماتریس انتقال، توان بازتاب توری براگ را بدست آورده و تأثیر مشخصات ساختاری توری از جمله اختلاف ضریب شکست و طول توری بر روی توان بازتابی آن بررسی شده است. در مرحله بعدی با حل معادلات انتشار موج دمش و موج سیگنال و معادلات نرخ یون های اربیوم در داخل محیط فعال لیزری، شبیه سازی لیزر انجام شده است. در این پایان نامه وابستگی توان خروجی و آستانه لیزرهای تار نوری به مشخصه های ساختاری توری براگ، طول، شعاع مغزی تار نوری لیزر، طول موج و توان موج دمش و غلظت یونهای آلاییده بررسی شده است.

نتایج مدل سازی توری براگ نشان میدهد، با افزایش طول توری، بیشینه توان بازتاب افزایش یافته و پهنای کاهش می یابد که برای تک مدسازی توری و لیزر می توان از آن استفاده کرد. همچنین شبیه سازی لیزر در دو ناحیه توانهای بالا و توانهای پایین انجام شده است.

شبیه سازی لیزر تار نوری آلاییده به یون اربیوم با بازتاب دهنده توری تار نوری براگ، به کمک روش رونگ-کوتا مرتبه چهارم انجام گرفته و نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تجربی و تئوری ای که تا کنون گزارش شده مقایسه شده و مشابه است.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱ مقدمه
- ۴ ۱-۱ هدف پایان‌نامه و ساختار ارائه مطالب

فصل دوم: مبانی فیزیکی تار نوری با توری براگ (FIBER BRAGG GRATING)

- ۶ ۱-۲ بررسی انتشار موج در یک تار نوری ساده
- ۱۱ ۲-۲ تارهای نوری با توری براگ
- ۱۲ ۱-۲-۲ تئوری مدکوپل شده در توری براگ
- ۱۷ ۳-۲ روش ماتریس انتقال
- ۲۰ ۴-۲ روشهایی ساخت توری در تارهای نوری
- ۲۰ ۱-۴-۲ روش تداخل‌سنجی
- ۲۲ ۲-۴-۲ روش ماسک فازی
- ۲۴ ۵-۲ قابلیت کوک‌پذیری لیزرهای تار نوری با توری براگ

فصل سوم: تئوری لیزر تار نوری آلاییده به یون اربوم با بازتابنده FBG

- ۲۷ ۱-۳ مروری بر لیزرهای تار نوری
- ۲۸ ۱-۱-۳ مشخصات کاواک لیزرهای تار نوری
- ۲۹ ۲-۱-۳ بازتاب‌دهنده ها
- ۲۹ ۱-۲-۱-۳ آینه‌های دی‌الکتریک
- ۳۰ ۲-۲-۱-۳ حلقه‌های تار بازتاب‌دهنده
- ۳۰ ۳-۲-۱-۳ توری‌های براگ

۳۱	۳-۱-۳ نقش عناصر خاکی نادر
۳۲	۳-۱-۴ نقش محیط میزبان
۳۲	۳-۲ لیزرهای تار نوری آلاییده به یون اربیوم
۳۳	۳-۲-۱ سطح مقطع مؤثر جذب و گسیل ترازهای یون اربیوم
۳۴	۳-۲-۲ نحوه دمش لیزر تار نوری آلاییده به یون اربیوم
۳۶	۳-۳ معادلات حاکم بر عملکرد لیزرتار نوری آلاییده به یون اربیوم
۳۹	۳-۳-۱ توان خروجی لیزر
۴۰	۳-۳-۲ لیزر تار نوری در شرایط آستانه
۴۲	۳-۳-۳ الگوریتم و روش حل معادلات
۴۵	۴-۳ تأیید نتایج حاصل از مدل سازی

فصل چهارم: تحلیل و بررسی نتایج عددی

۴۸	۴-۱ نتایج مدل سازی FBG
۴۹	۴-۱-۱ تأثیر اختلاف ضریب شکست مؤثر لایه های توری بر روی طیف بازتابی آن
۴۹	۴-۱-۲ تأثیر طول توری بر روی طیف بازتابی
۵۰	۴-۱-۳ بررسی توری براگ با در نظر گرفتن انتقال فاز
۵۱	۴-۲ نتایج مربوط به لیزر تار نوری با بازتابنده براگ
۵۲	۴-۲-۱ توان آستانه موج دمش
۵۴	۴-۲-۲ توان خروجی لیزر
۶۱	۴-۲-۲-۱ بررسی توان خروجی به ازای توان دمش پایین
۶۳	۴-۲-۳ بهره سیگنال

۶۵ ۴-۲-۴ توان دمش و سیگنال

۶۷ ۳-۴ بهینه‌سازی و طراحی لیزر EDFL با بازتابنده براگ

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷۰ نتیجه‌گیری

۷۱ پیشنهادات

۷۲ مراجع

۷۶ **abstract**

فهرست شکلها

- شکل ۱-۱ طرح ساده ای از لیزر تار نوری (الف) ساختار DBR (ب) ساختار DFB ۴
- شکل ۱-۲ تار نوری ساده و بخشهای تشکیل دهنده آن ۶
- شکل ۲-۲ نمای از رو بروی یک تار نوری ساده ۷
- شکل ۳-۲ نحوه انتشار نور در یک تار نوری ساده ۷
- شکل ۴-۲ طرح ساده‌های از یک تار نوری با ساختار تناوبی ضریب شکست و با دوره تناوب Λ . ۱۱
- شکل ۵-۲ تغییرات δn_{eff} نسبت به محور تار برای دو نوع FBG ۱۲
- شکل ۶-۲ کوپلشدگی بین مدها در توری یکنواخت ۱۳
- شکل ۷-۲ نمودار توان بازتاب و عبور توری تار نوری براگ ۱۶
- شکل ۸-۲ نمودار توان بازتاب دو توری یکنواخت دارای انتقال فاز ۱۸
- شکل ۹-۲ توزیع میدان داخل دو نوع توری ۱۹
- شکل ۱۰-۲ ساخت توری به روش تداخلسنجی با تقسیم دامنه ۲۰
- شکل ۱۱-۲ ساخت توری به روش تداخلسنجی با تقسیم جبهه موج ۲۱
- شکل ۱۲-۲ ساخت توری به روش pm ۲۲
- شکل ۱-۳ طرحی ساده از یک لیزر تار نوری ۲۷
- شکل ۲-۳ الف-استفاده از حلقه های بازتاب دهنده و ب-توری های براگ به منظور ایجاد فیدبک لیزری ۲۸
- شکل ۳-۳ نمای ساده‌های از یک کاواک حلقه‌های لیزر تار نوری ۲۹
- شکل ۴-۳ نمای ساده‌های از بازتابدهنده حلقه‌های ۳۰
- شکل ۵-۳ ترازهای انرژی یون اربیوم ۳۳

- شکل ۳-۶ طیف سطح مقطع جذب و گسیل یون اربوم ۳۴
- شکل ۳-۷ طول موجهای پمپاژ یون اربوم ۳۵
- شکل ۳-۸ جذب حالت برانگیخته الف) سیگنال و ب) دمش ۳۶
- شکل ۳-۹ نمایی از ترازهای اصلی یون اربوم در عملیات لیزر EDFL ۳۷
- شکل ۳-۱۰ نمایی از یک لیزر تار نوری به طول L با بازتابنده های به ترتیب R_1 و R_2 ۳۹
- شکل ۳-۱۱ روندنمای تحلیل شرایط بالای آستانه ۴۴
- شکل ۳-۱۲ طیف توان بازتاب به ازای سه مقدار مختلف δn_{eff} مربوط به نتایج ارائه شده در [۲۵] ۴۵
- شکل ۳-۱۳ طیف توان بازتاب به ازای سه مقدار مختلف δn_{eff} ۴۵
- شکل ۳-۱۴ تغییرات توان دمش و سیگنال در طول لیزر EDFL مربوط به نتایج ارائه شده در [۵۴] ۴۶
- شکل ۳-۱۵ تغییرات توان دمش و سیگنال در طول لیزر EDFL ۴۶
- شکل ۴-۱ طیف توان بازتاب، R ، و عبور، T ، یک ساختار FBG به طول $L_G=1\text{ cm}$ و $\delta n_{eff}=10^{-4}$ ۴۸
- شکل ۴-۲ طیف توان بازتاب به ازای مقادیر مختلف اختلاف ضریب شکست مؤثر ۴۹
- شکل ۴-۳ طیف توان بازتاب، به ازای مقادیر مختلفی از طول توری ۴۹
- شکل ۴-۴ طیف توان بازتاب توری با انتقال فاز $\pi/2$ در وسط ۵۰
- شکل ۴-۵ طیف توان بازتاب توری با دو انتقال فاز متفاوت $\pi/2$ و $\pi/4$ ۵۱
- شکل ۴-۶ تغییرات توان دمش آستانه لیزر بر حسب طول محیط فعال لیزر ۵۲
- شکل ۴-۷ تغییرات توان دمش آستانه لیزر بر حسب شعاع مغزی تار ۵۳
- شکل ۴-۸ تغییرات توان دمش آستانه لیزر بر حسب بازتاب توری (FBG2) ۵۴
- شکل ۴-۹ وابستگی توان خروجی به توان دمش ۵۴
- شکل ۴-۱۰ وابستگی توان خروجی به توان دمش با در نظر گرفتن توریهای متفاوت به عنوان (FBG2) ۵۵
- شکل ۴-۱۱ تغییرات توان خروجی بر حسب طول محیط فعال و به ازای مقادیری از توان دمش آستانه ۵۶

- شکل ۴-۱۲ تغییرات توان خروجی بر حسب طول محیط فعال لیزر و با در نظر گرفتن توری های متفاوت به عنوان بازتابنده (FBG2) ۵۷
- شکل ۴-۱۳ تغییرات توان خروجی بر حسب طول محیط فعال لیزر و با در نظر گرفتن شعاعهای مختلف برای مغزی تار ۵۷
- شکل ۴-۱۴ تغییرات توان خروجی بر حسب طول محیط فعال و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف غلظت ۵۸
- شکل ۴-۱۵ تغییرات توان خروجی بر حسب موج دمش به ازای شعاعهای مختلف مغزی تار ۵۹
- شکل ۴-۱۶ تغییرات توان خروجی بر حسب بازتابندگی توری (FBG1) برای مقادیری از توان دمش ۵۹
- شکل ۴-۱۷ تغییرات توان خروجی بر حسب درصد بازتابندگی توری (FBG1) را به ازای مقادیر مختلف طول کاواک ۶۰
- شکل ۴-۱۸ تغییرات توان خروجی بر حسب درصد بازتابدهی توری (FBG2)، برای مقادیر مختلف بازتاب دهی توری (FBG1) ۶۰
- شکل ۴-۱۹ وابستگی توان خروجی به توان دمش، برای لیزرهایی با طول متفاوت ۶۱
- شکل ۴-۲۰ تغییرات توان خروجی لیزر بر حسب طول کاواک به ازای شعاع مغزی تار متفاوت ۶۲
- شکل ۴-۲۱ تغییرات توان خروجی بر حسب موج دمش به ازای شعاعهای مختلف مغزی تار ۶۲
- شکل ۴-۲۲ تغییرات توان خروجی بر حسب طول محیط فعال و با در نظر گرفتن مقادیر مختلف غلظت ۶۳
- شکل ۴-۲۳ تغییرات بهره سیگنال در طول کاواک، به ازای مقادیر مختلف بازتابدهی توری (FBG2) ۶۴
- شکل ۴-۲۴ تغییرات توان دمش و سیگنال در امتداد محیط فعال لیزری (الف) توری (FBG2) با بازتاب ۷۰ درصد (ب) توری (FBG2) با بازتاب ۲۰ درصد ۶۵
- شکل ۴-۲۵ تغییرات توان سیگنال رفت و برگشت در امتداد محیط فعال لیزر به ازای بازتابهای مختلف توری (FBG2) ۶۶
- شکل ۴-۲۶ تغییرات توان دمش در امتداد محیط فعال لیزر به ازای بازتابهای مختلف توری (FBG2) ۶۶

فهرست جداول

۵۲	جدول ۱-۴ مشخصات توری‌ها به عنوان FBG1 و FBG2
۵۲	جدول ۲-۴ مقدار عددی پارامترهای بکار رفته در محاسبات برای لیزر EDFL [۵۴].
۶۸	جدول ۳-۴ مشخصات ۱۰ نمونه لیزر با توان خروجی ۲۰ mW
۶۸	جدول ۴-۴ مشخصات ۱۰ نمونه لیزر با توان خروجی ۴۰۰ mW

فصل اول

مقدمه

بررسی تجربی لیزرهای تار نوری تقریباً همزمان با اختراع لیزرهای گازی و حالت جامد و از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی شروع و بتدریج با شناخته شدن کاربردهای متنوع آن مورد توجه زیادی قرار گرفت. محیط میزبان لیزرهای تار نوری از جنس شیشه است که به شکل تارهای نوری ساخته می‌شوند. یونهای عناصر خاکی نادر تزریق شده به محیط میزبان شرایط بهره و تقویت نور را در این لیزرها فراهم می‌کنند.

توان خروجی لیزرهای تار نوری اولیه در حد میلی‌وات بود اما امروزه به توان‌های خروجی بالای چند کیلووات دست یافته‌اند. از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ خروجی لیزرهای تار نوری پیوسته از ۱۰۰ وات به ۳۰۰۰ وات افزایش یافته است. معمولاً در لیزرهای پرتوان از تارهای نوری دو غلافه استفاده می‌شود [۱].

اولین لیزرهای تار نوری آلانئیده به یون اربیم (EDFL)^۱، در سال ۱۹۶۱ میلادی ساخته شد. در سال ۱۹۷۳ از تارهای نوری سیلیکایی با اتلاف پایین برای ساخت لیزرهای تار نوری استفاده شد [۲]. در اواخر دهه ۱۹۸۰ لیزرهای تار نوری به طور چشمگیری توسعه یافتند. تحقیقات اولیه به طور عمده بر روی تارهای نوری آلانئیده به اربیم و نئودیموم متمرکز بود، زیرا این دو یون به ترتیب بهره نوری در طول موج‌های ۱/۳ و ۱/۵ میکرومتر را فراهم می‌کنند. که تلفات پایینی در پنجره مخابراتی دارند. از سایر یونها مانند هولیوم، ساماریوم، تولیوم و ایتربیوم نیز برای محیط فعال لیزرهای تار نوری و در طول موج‌های دیگر استفاده شده‌اند [۳].

¹ Erbium Doped Fiber Laser(EDFL)

عملکرد لیزرهای EDFLها براساس سازوکار لیزرهای سه ترازه بوده و معمولاً از لیزرهای نیمه‌رسانا در طول موج ۹۸۰ و ۱۴۸۰ نانومتر برای دمش آنها استفاده می‌شود. لیزرهای آلاییده به یون اربوم می‌توانند در چندین ناحیه فرکانسی، از نور مرئی تا مادون قرمز عمل کنند اما از آنجاییکه ناحیه ۱۵۵۰ نانومتر برای مخابرات نوری با تلفات پایین محسوب می‌شود، بیشترین توجه به این ناحیه معطوف شده است [۱]. لیزرهای تار نوری آلاییده به عناصر خاکی نادر، به دلیل مزایایی از جمله ابعاد کوچک، وزن پایین، کیفیت بالای باریکه خروجی، بازده و توان بالا جایگزین مناسبی برای لیزرهای حالت جامد، بشمار می‌روند.

یکی از پرکاربردترین این لیزرها، EDFL می‌باشد که در سیستم‌های مخابرات نوری، حسگرهای نوری، سوئیچ نوری، پزشکی، اسپکتروسکوپی و ابزارهای اندازه‌گیری استفاده می‌شود. عملکرد تک‌مدی، پهنای خط باریک، گسیل در ناحیه ۱۵۵۰ نانومتر و قابلیت کوک‌پذیری در این لیزرها سبب شده موقعیت ویژه‌ای در تحقیقات و تکنولوژی بدست آورند [۴].

تنظیم طول موج، تک‌مد سازی، تمایز بین مدها و فیدبک نوری در لیزرهای تار نوری به روشهای مختلف، صورت می‌گیرد. در کاربردهایی مانند اسپکتروسکوپی با جداسازی بالا، لیدار و همچنین خطوط مخابراتی پرسرعت لازم است که از منابع تابش تک مد که یک مد طولی تولید می‌کنند استفاده شود. ایجاد منبع تک مد در لیزرهای تار نوری با کاواک حلقه‌ای امکان‌پذیر است. ولی این وسایل پیچیده و پرهزینه می‌باشند در حال حاضر استفاده از توری‌های تار نوری براگ به دلیل اتلاف پایین، خاصیت گزینش بالا، غیرفعال بودن محیط توری و هزینه کم سودمندتر از روشهای دیگر تشخیص داده شده است. [۵].

توری تار نوری براگ (FBG)^۱، ساختار تناوبی ضریب شکست در طول تار است که معمولاً در اثر تداخل پرتوهای نور ماورای بنفش در مغزی تار ایجاد می‌شود. مهمترین خصوصیت توریهای FBG، بازتاب و عبور گزینشی نور در فرکانسی خاص و یا در نوار فرکانسی باریکی حول فرکانس براگ می‌باشد. پهنای نوار فرکانسی به دوره تناوب توری و اختلاف ضریب شکست ایجاد شده بستگی دارد [۶]. قابلیت حساسیت به نور^۲ تارهای نوری که سبب ایجاد تغییرات ضریب شکست در مغزی تار نوری می‌شود اولین بار توسط گروه هیل در سال ۱۹۷۸ در مرکز تحقیقات مخابراتی کانادا کشف و گزارش شد [۷ و ۸].

با استفاده از توریهای تار نوری براگ با لیزرهای تار نوری به عنوان آینه بازتابنده می‌توان لیزرهایی با مرتبه کوک‌پذیری بالا و تک مد به ایجاد کرد [۹]. اولین بار از FBG ها در لیزرهای تار نوری آلاییده به یون

¹ Fiber Bragg Grating (FBG)

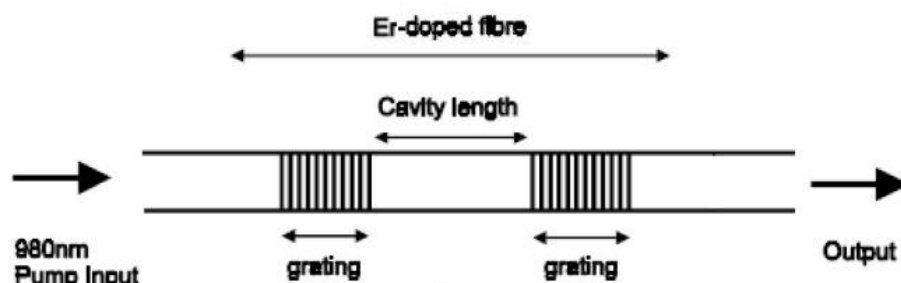
² Photosensitivity

اربیوم با عملکرد تک فرکانس و پایداری طول موجی و نویز پایین و پهنای خط باریک در سال ۱۹۹۱ گزارش شده است [۱۰].

با استفاده از تکنولوژی ایجاد توری براگ در تار نوری، می‌توان لیزرهای تار نوری^۱ DBR و^۲ DFB که دارای پهنای خط بینایی بسیار باریک در حدود ۲ تا ۱۵ کیلوهرتز، طول کم چند سانتیمتر و نویز پایین باشند طراحی نمود [۱۱]. در شکل ۱-۱ طرح ساده ای از لیزر تار نوری با ساختارهای DBR و DFB، نشان داده شده است.

در این پایان نامه لیزر تار نوری با در نظر گرفتن توری تار نوری براگ به عنوان بازتابنده بررسی شده است که ساختاری تقریباً مشابه با لیزر DBR دارد.

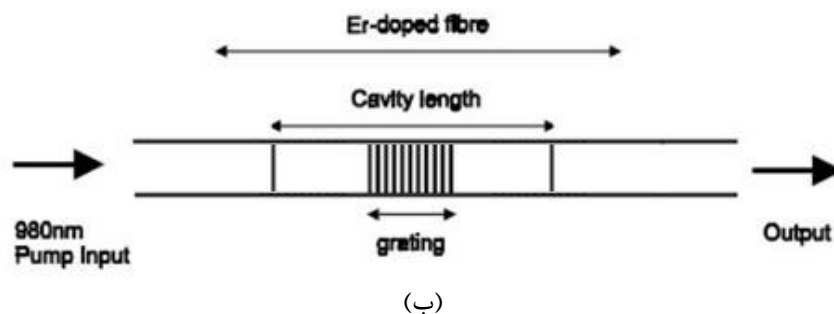
لیزرهای تار نوری آلائیده به یون اربیوم با ساختار DBR قابلیت کوک‌پذیری پیوسته [۱۲] داشته و می‌توان با تغییر دوره تناوب توری بصورت نامنظم و یا خطی و ایجاد انتقال فاز میزان کوک‌پذیری لیزر را تنظیم کرد [۱۳ و ۱۴]. پایداری فرکانسی در لیزرها تار نوری DBR با استفاده از روش تداخل‌سنجی ایجاد می‌شود [۱۵]. بهینه‌سازی خروجی لیزرهای تار نوری DBR با در نظر گرفتن دمش‌های قوی در [۱۶ و ۱۷ و ۱۸ و ۱۹] بررسی شده است. از لیزرهای تار نوری DBR به عنوان هیدروفون در دریا‌های عمیق استفاده می‌شود [۲۰]. تأثیر دما و ضریب شکست به طور همزمان بر روی این لیزرها بررسی شده است [۲۱].



(الف)

¹ Distributed Bragg Reflector

² Distributed Feedback



شکل ۱-۱ طرح ساده ای از لیزر تار نوری (الف) ساختار DBR (ب) ساختار DFB

۱-۴ - هدف پایان نامه

هدف این پایان نامه بررسی و تحلیل تئوری لیزرهای تار نوری آلاییده به یون اربیم با بازتاب دهنده FBG می باشد. شبیه سازی با حل معادلات مربوط به انتشار موج دممش و موج سیگنال و معادلات نرخ یون های اربیم در داخل محیط فعال لیزری انجام می شود. میزان توان خروجی و آستانه لیزرهای تار نوری به مشخصه های ساختاری توری براگ (اختلاف ضریب شکست و طول توری) به عنوان بازتاب دهنده، طول تار نوری، شعاع مغزی تار، طول موج و توان موج دممش و غلظت یونهای آلاییده بستگی دارد که در این پایان نامه عملکرد لیزر با توجه به این پارامترها بررسی می شود. در فصل دوم پایان نامه مبانی فیزیکی توری تار نوری براگ بیان شده و روش ماتریس انتقال به منظور مدل سازی FBG توضیح داده می شود. فصل سوم الگوریتم روش عددی رونگ-کوتا که در شبیه سازی لیزر تار نوری آلاییده به یون اربیم با بازتاب دهنده براگ ارائه شده است. فصل چهارم به تجزیه و تحلیل نتایج عددی بدست آمده و طراحی چند لیزر تار نوری آلاییده به یون اربیم با بازتاب دهنده توری براگ اختصاص یافته است. در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات برای ادامه ارائه شده است.

فصل دوم

مبانی فیزیکی

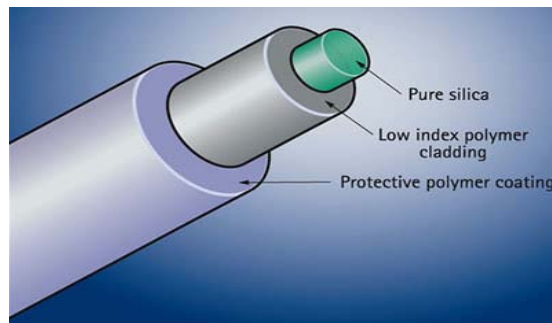
تار نوری با توری براگ

(FIBER BRAGG GRATING)

در این فصل ابتدا تئوری انتشار موج در یک تار نوری ساده بطور مختصر بیان شده سپس تار نوری با توری براگ معرفی و مشخصات و معادلات حاکم بر آن توضیح داده می‌شود. روش ماتریس انتقال نیز که برای تعیین ضرایب بازتاب و عبور تار نوری توری براگ روش کارآمدی است در این فصل توضیح داده می‌شود و در پایان فصل به چند روش ساخت توری‌های براگ در تار نوری اشاره خواهد شد.

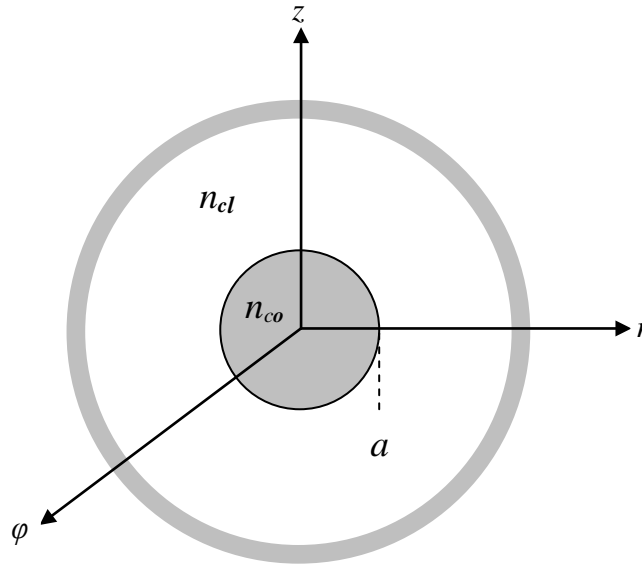
۱-۲) بررسی انتشار موج در یک تار نوری ساده

همانطور که در شکل (۱-۲) نشان داده شده یک تار نوری ساده از سه بخش اصلی تشکیل شده است. الف- هسته تار که داخلی‌ترین قسمت تار نوری و عهده‌دار انتشار موج الکترومغناطیس بوده و دارای بیشترین مقدار ضریب شکست نسبت به لایه‌های خارجی است. هسته تار معمولاً از جنس شیشه سیلیکا با ضریب شکست $1/45$ و بر حسب نوع کاربرد دارای شعاعی در حدود ۳ میکرومتر می‌باشد. ب- پوشش تار که دور تا دور هسته را احاطه کرده و دارای ضریب شکستی کمتر از هسته بوده و باعث بازتاب کلی نور به داخل هسته می‌شود. این پوشش معمولاً از جنس پلیمر با ضریب شکست $1/40$ و بر حسب نوع کاربرد دارای شعاعی در حدود ۳۰ میکرومتر می‌باشد. پ- روکش پلاستیکی که باعث حفاظت تار در مقابل رطوبت و سایر موارد آسیب پذیر می‌شود.



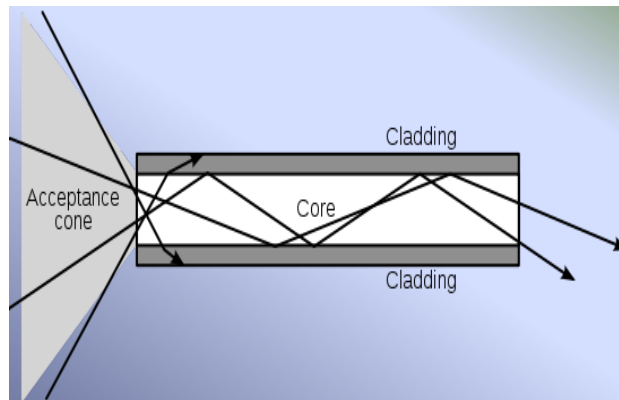
شکل ۱-۲: تار نوری ساده و بخش‌های تشکیل دهنده آن

در شکل (۲-۲) نمای از روبروی یک تار ساده با مغزی به شعاع a و ضریب شکست n_{co} که توسط غلافی به ضریب شکست n_{cl} پوشانده شده نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: نمای از رو بروی یک تار نوری ساده

در شکل (۲-۳) نحوه انتشار نور در یک تار نوری ساده نشان داده شده است. انتشار نور در یک تار نوری بر اساس پدیده بازتاب داخلی و یا بازتاب کلی صورت میگیرد.



شکل ۲-۳: نحوه انتشار نور در یک تار نوری ساده

دامنه میدان الکتریکی موج منتشر شده در تار نوری از معادله دیفرانسیل زیر پیروی می کند [۲۲].

$$\nabla^2 E_Z(r, \varphi, z, \omega) + n^2(r, \omega)k_0^2(\omega)E_Z(r, \varphi, z, \omega) = 0 \quad (1-2)$$

که در آن $E_Z(r, \varphi, z, \omega)$ دامنه موج در دستگاه مختصات استوانه‌ای، k_0 عدد موج است و:

$$n(r, \omega) = \begin{cases} n_{co} & r \leq a \\ n_{cl} & r > a \end{cases} \quad (2-2)$$

برای معادله (۱-۲) پاسخی به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$E_Z(r, \varphi, z, \omega) = A_Z(\omega)R_Z(r)e^{im\varphi}e^{i\beta z} \quad (3-2)$$

با در نظر گرفتن لاپلاسیان در مختصات استوانه‌ای و جایگذاری رابطه (۳-۲) در (۱-۲) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}R_Z(r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}R_Z(r) + \left(\xi^2 - \frac{m^2}{r^2}\right)R_Z(r) = 0 \quad (4-2)$$

که در آن:

$$\xi^2 = n^2(r)k_0^2 - \beta^2 \quad (5-2)$$

β ثابت انتشار مد در امتداد محور z می‌باشد و کمیتی مختلط و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\beta = n_{eff}k_0 - i\alpha \quad (6-2)$$

در این رابطه n_{eff} ضریب شکست موثر مد و α ضریب اتلاف مد می‌باشد.

عبارت (۴-۲) یک معادله دیفرانسیل بسل می‌باشد که با در نظر گرفتن مقادیر مثبت برای ξ^2 جواب آن به صورت زیر می‌باشد:

$$R_{z,m}(r) = AJ_m(\xi r) + BY_m(\xi r) \quad (7-2)$$

در رابطه A و B دارای مقادیر ثابت، m عدد مد، J_m و Y_m به ترتیب توابع بسل مرتبه اول و دوم می‌باشند. با در نظر گرفتن $\gamma^2 = -\xi^2$ معادله (۴-۲) به معادله زیر تبدیل می‌شود:

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}R_Z(r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}R_Z(r) - \left(\gamma^2 + \frac{m^2}{r^2}\right)R_Z(r) = 0 \quad (8-2)$$

این عبارت یک معادله بسل تعمیم یافته می باشد که برای مقادیر مثبت γ^2 می توان جوابی به صورت زیر برای آن در نظر گرفت:

$$R_{z,m}(r) = CI_m(\gamma r) + DK_m(\gamma r) \quad (9-2)$$

در رابطه C و D دارای مقادیر ثابت، m عدد مد، I_m و K_m به ترتیب توابع بسل تعمیم یافته مرتبه اول و دوم می باشند.

اگر فرض کنیم:

$$\beta^2 \geq n_{co}^2 k_0^2 \quad (10-2)$$

معادله نمی تواند پاسخ معادله موج در غلاف تار باشد زیرا برای مقادیر بزرگ r ، $I_m \rightarrow \infty$ می رود. همچنین طبق شرایط مرزی میدان و مشتق آن در سطح مشترک مغزی و غلاف باید پیوسته باشد که با در نظر گرفتن فرض (۲-۱۵) چنین شرطی حاصل نمی شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حل فیزیکی برای معادله موج (۲-۱) در ناحیه $\beta^2 \geq n_{co}^2 K_0^2$ وجود ندارد. همینطور اگر فرض شود:

$$\beta^2 \leq n_{cl}^2 k_0^2 \quad (11-2)$$

Y_m و J_m برای $r \rightarrow \infty$ دارای رفتار سینوسی بوده و این بدین معنی می باشد که انرژی به خارج از تار انتقال می یابد و در این حالت مدهای تابشی را داریم بنابراین می توان نتیجه گرفت انتشار امواج عرضی غیر تابشی تار فقط در ناحیه زیر صورت می پذیرد:

$$n_{cl}^2 k_0^2 < \beta^2 < n_{co}^2 k_0^2 \quad (12-2)$$

تابع بسل مرتبه دوم Y_m و تابع بسل تعمیم یافته مرتبه اول I_m به ترتیب برای نواحی $r \rightarrow 0$ و $r \rightarrow \infty$ دارای مقدار نامحدود بوده و می توان پاسخ عرضی معادله موج را برای نواحی $r < a$ و $r > a$ به صورت زیر در نظر گرفت:

$$R_{z,m}(r) = \begin{cases} AJ_m(\xi r) & r \leq a \\ DK_m(\gamma r) & r > a \end{cases} \quad (13-2)$$

که در این رابطه

$$\xi^2 = n_{co}^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (۱۴-۲\text{الف})$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_{cl}^2 k_0^2 \quad (۱۴-۲\text{ب})$$

کمیت‌های بدون بعد u و w را به شکل زیر تعریف میکنیم.

$$\begin{cases} u = K_0 n_{co} a \\ w = K_0 n_{cl} a \end{cases} \quad (۱۵-۲)$$

که با توجه به روابط (۱۹-۲) و (۲۰-۲)، رابطه زیر به دست می‌آید.

$$u^2 + w^2 = K_0^2 (n_{co}^2 - n_{cl}^2) a^2 \quad (۱۶-۲)$$

عبارت بالا مقدار ثابتی است که آن را فرکانس نرمالیزه نامیده و معمولا با حرف V نشان میدهند

$$V = K_0 a N A = \frac{2\pi}{\lambda} a (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (۱۷-۲)$$

پارامتر V تعداد مدهای هدایت شده در تار را مشخص میکند و برای داشتن تار نوری تک مد باید شرط $V < 2.405$ را حفظ نماید [۲۳]. در رابطه (۱۷-۲)، NA به عنوان گشودگی عددی تار نوری معرفی میشود که در سیستم‌های نوری برای تعیین بیشینه زاویه پذیرش نور ورودی به سیستم مورد استفاده قرار میگیرد.

با اعمال شرایط مرزی روی سطح مشترک مغزی و غلاف رابطه زیر بین ثابتهای D و A بدست می‌آید:

$$A J_m(\xi a) = D K_m(\xi a) \rightarrow \frac{D}{A} = \frac{J_m(\xi a)}{K_m(\gamma a)} \quad (۱۸-۲)$$

بنابراین می‌توان پاسخی کلی به صورت زیر برای معادله موج (۶) در نظر گرفت:

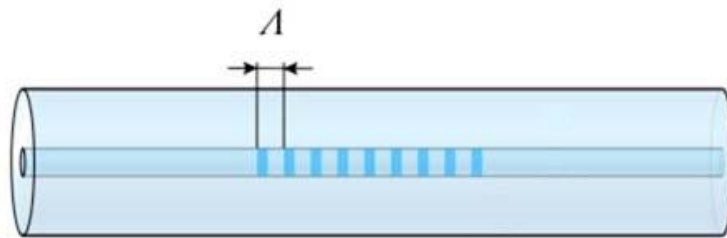
$$E_{z,m}(r, \phi, z, \omega) \propto \begin{cases} J_m(\xi r) e^{im\phi} e^{i\beta z} & r \leq a \\ \frac{J_m(\xi a)}{K_m(\gamma a)} K_m(\gamma r) e^{im\phi} e^{i\beta z} & r > a \end{cases} \quad (۱۹-۲)$$

۲-۲) تارهای نوری با توری براگ

اساساً یک تار نوری با توری براگ^۱، FBG، اختلال یا تغییرات تناوبی ضریب شکست در طول یک تار نوری است که بین دوره تناوب توری و طول موج براگ رابطه زیر برقرار است [۲۲]:

$$\lambda_B = \frac{2n_{eff}\Lambda}{m} \quad (20-2)$$

در این رابطه n_{eff} ضریب شکست موثر توری در مغزی تار، m مرتبه توری و Λ دوره تناوب توری است. در شکل ۲-۴ طرح ساده‌ای از یک تار نوری با ساختار تناوبی ضریب شکست و با دوره تناوب Λ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- طرح ساده‌ای از یک تار نوری با ساختار تناوبی ضریب شکست و با دوره تناوب Λ .

تغییرات ضریب شکست در امتداد z و طول تار نوری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$n(r, \phi, z) = \begin{cases} n_{co} + \delta n_{eff}(z) & r \leq a \\ n_{cl} & r > a \end{cases} \quad (21-2)$$

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}(z)} \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (22-2)$$

¹ Fiber Bragg Grating