بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم

بخش فیزیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش اتمی و مولکولی

صاف‌سازی ذاتی طیف بهره‌ی تقویت‌کننده‌ی فیبر نوری آغشته به اربیم

استاد راهنما :

دکتر علی‌رضا بهرامپور

مؤلف :

فاطمه دهقان‌نیک

شهریورماه ۱۳۹۰

تقدیم به :

پدر و مادرم و خواهر عزیزم که در همه‌ی سختی‌ها همراهم بوده.

تشکر و قدردانی :

پس از حمد و سپاس به درگاه ایزد منان، حال که به لطف پروردگار مهربان توانسته-ام دوره‌ای دیگر اززندگیم را به پایان برسانم، در اینجا از کسانی که مرا در این راه یار و یاور بودند، خانواده گرامی، استا بزرگوارم دکتر بهرامپور و دوستان عزیز با کلماتی نه شایسته‌ی زحماتشان، از آن‌ها تشکر و قدردانی می‌کنم.

چکیده

طیف بهره‌ی تقویت کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم (EDFA[1]) به وسیله‌ی طیف‌های سطح مقطع جذب و گسیل یون‌های اربیم ، توان پمپ، طول موج پمپ، طول تقویت کننده فیبر، توزیع‌های شعاعی ضریب شکست و غلظت اربیم تعیین می‌شود. EDFAها در سیستم‌های ارتباطی فیبر اپتیکی، بخصوص در سیستم‌های تقسیم طول موج مفید (WMD[2]) هستند. بنابراین صاف سازی طیف بهره‌ی EDFA یک مسئله‌ی اساسی در سیستم‌های تقسیم طول موج چگال(DWDM[3]) می‌باشند. روش‌های زیادی برای صاف سازی بهره‌ی EDFA توسعه یافت. برخی از این روشها نیازمندیک یا چند وسیله اپتیکی هستند و در برخی دیگر صاف سازی بصورت ذاتی انجام می‌شوند. قاعده کلی صاف سازی بهره‌ی ذاتی EDFAها بر اساس این حقیقت است که شعاع مد های انتشار ، وابسته به طول موج هستند.

در این پایان نامه، روش وردشی برای بدست آوردن شرایط بهینه برای کمینه کردن اعوجاج بهره بکار برده می‌شود،که این عملیات روی غلظت اربیم و ضریب شکست صورت می‌گیرد و سر انجام نشان داده می‌شود که تغییرات شعاعی غلطت اربیم و ضریب شکست بصورت تکه‌ای ثابت هستند.

کلید واژه: تقویت‌کننده، روش وردشی، صاف‌سازی، فیبر

[1] Erbium Doped Fiber Amplifier
[2] wavelength division multiplexing
[3] Dense Wavelength Division Multiplexing

فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه ----------۱

فصل دوم: تقویت‌کننده‌های فیبر نوری آغشته به عناصر خاکی کمیاب ----------٦

۱،۲ فیبر نوری ----------۷

۲،۲ لزوم تقویت----------۸

۱،۲،۲ تقویت‌کننده‌های فیبر نوری ----------۹

۲،۲،۲ تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته شده ----------۹

۳،۲ عناصر قلیایی خاکی ----------۱۰

۱،۳،۲ تقویت‌کننده‌های فیبر نوری آغشته به خاک‌های کمیاب----------۱۱

۲،۳،۲ تقویت با استفاده از فیبرهای شیشه‌ای فلورید آغشته به اربیم ----------۱۳

٤،۲ اصول تقویت در تقویت‌کننده‌های اپتیکی----------۱٦

۵،۲ انواع تقویت‌کننده‌های اپتیکی ----------۱٦

۱.۵.۲ تقویت‌کننده‌های لیزر نیمه‌رسانا ----------۱٦

۲.۵.۲ تقویت‌کننده‌های فیبر رامان ----------۱٦

۳.۵.۲ تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته به اربیم ----------۱۷

٤،۵،۲ تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته به نقطه‌های کوانتومی----------۱۷

٦.۲ عمکرد تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته به اربیم ----------۱۷

1.6.2 مکانیسم عملکرد تقویت‌کننده‌ی EDFA ----------۱۸

۷.۲ طیف بهره و اشباع بهره ----------۱۹

۱.۷.۲ پارامترها و فرآیندهای محدودکننده‌ی بهره ----------۲۱

۱.۱.۷.۲ غلظت و بیشینه‌ی حلالیت اربیم ----------۲۱

2.1.7.2 تلفات مربوط به موجبر ----------۲۱

3.1.7.2 همپوشانی مدها ----------۲۲
4.1.7.2 طول‌موج منبع پمپ ----------۲۲
۵.۱.۷.2 جذب پمپ ----------۲۲
۸.۲ اصول تقویت در سیستم‌های سه ترازی ----------۲۳
۱.۸.2 تنظیم سیستم معادلات آهنگ سه ترازی ----------۲۳
2.8.2 بهره‌ی سیگنالی کوچک ---------- ۲۸
3.۸.۲ کاهش سیستم سه سطحی به سیستم دو سطحی ----------۳۱
۱.۳.۸.2 اهمیت رسیدن به دو سطح ----------۳۱
۲.۳.۸.۲ معادلات آهنگ تعمیم‌یافته ----------۳۳

فصل سوم: روش‌های صاف‌سازی طیف بهره در تقویت‌کننده‌های **EDFA** ----------۳۵
۱،۳ صاف‌سازی بهره‌ی EDFA با استفاده از شبکه‌های فیبر با دوره‌ی تناوب بلند بر اساس روش قوس الکتریکی ----------۳۶
۱،۱،۳ ساخت و مشخصات شبکه‌ی فیبر با دوره‌ی تناوب بلند----------۳۶
۲،۱،۳ صاف‌سازی بهره‌ی EDFA ----------۳۷
۳،۱،۳ نتایج----------
۳۹
۲.۳ بهینه‌سازی بهره‌ی یک تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم و EDFA با بهره‌ی تقویت‌شده‌ی دو مرحله‌ای با پهنای باند مسطح ٤٥ nm در باند L ----------۳۹
۱،۲،۳ EDFA با بهره‌ی صاف شده‌ی دو مرحله‌ای ----------٤۱
۲،۲،۳ نتیجه‌گیری ----------٤۲
۳.۳ تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم با بهره‌ی صاف شده‌ی در ۳۵ nm با استفاده از فیلترهای تنظیم‌پذیر آکوستیکی- اپتیکی تمام فیبری ----------٤۳
٤.۳ بهینه‌سازی بهره مسطح باند Cی EDFA با استفاده از خمش بزرگ(Macro – Bending)
----------٤۷
۱،٤،۳ چینش آزمایش ----------٤۸

۳،٤،۲ بحث و نتیجه ---------- ----------
٤٩
۵.۳ طراحی جدید یک فیبر آغشته به اربیم با بهره‌ی ذاتاً مسطح----------۵۳
۳،۵،۱ قاعده‌ی کلی عمل ----------
۵۳
۳،۵،۲ آنالیز ----------
۵٤
۳،۵،۳ بحث و نتایج عددی ----------۵٦
٦.۳ طراحی و ساخت یک تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم با بهره‌ی ذاتاً مسطح----------٦۲
۳،٦،۱ قاعده‌ی کلی عمل ----------٦۲
۳،٦،۲ ساختار فیبر و نتایج----------٦۵

فصل چهارم: حل تحلیلی صاف‌سازی بهره به روش وردشی ----------٦۹
۱،٤ خلاصه‌ای درباره‌ی معادلات آهنگ ----------۷۰
۲،٤ تقریب گوسی برای مد اصلی فیبر نوری ----------۷۱
۳،٤ روش وردشی برای کمینه کردن اعوجاج بهره در تقریب گوسی ----------
۷۳
٤،٤ معادلات حاکم----------۷٤
۵،٤ کمینه کردن اعوجاج بهره به روش وردشی ----------۸۰
۱،۵،٤ تقریب گوسی برای مد اصلی ----------۸٤

فصل پنجم: نتیجه‌گیری ----------۹۱

منابع ----------۹۳

فصل اول

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی ساخت فیبرهای نوری در دهه‌ی ۱۹۷۰، مخابرات نوری توسعه و تکامل بیشتری پیدا کرد. یکی از راههایی که امروزه برای انتقال اطلاعات به کار می‌رود، استفاده از فیبرهای نوری است، که این اطلاعات می‌توانند به شکل صدا، تصویر و یا داده‌های رایانه‌ای باشند. در سیستم ارتباطات نوری، نور گسیل شده از فرستنده که از طریق خطوط انتقال نوری انتقال پیدا می‌کند وقتی به گیرنده می‌رسد، ضعیف شده است. وقتی توان نوری که به گیرنده می‌رسد کوچکتر از مقدار تعیین شده برسد، گیرنده خطا می‌دهد و این از انجام ارتباط نوری جلوگیری می‌کند.

شبکه‌های ارتباطی نوری در شبکه‌های دوربرد به ویژه با طول بزرگتر از ۶۰۰km، تضعیف سیگنال را به دلیل فاکتورهای مختلف، همچون پراکندگی، جذب و خمش متحمل می‌شود. بنابراین یک تقویت‌کننده‌ی نوری بین فرستنده و گیرنده قرار داده می‌شود که نور را تقویت کند، در نتیجه برای جبران این اتلافات و برای انتقال نور در مسافت زیاد با خطای کمتر، استفاده می‌شود. تقویت-کننده‌ی نوری یکی از اجزای کلیدی درک مسافت طولانی و ظرفیت بزرگ سیستم ارتباطات نوری است. تکنولوژی‌های مربوط به انتقال اطلاعات، خیلی سریع در چند دهه‌ی اخیر گسترش پیدا کرد. تکنولوژی‌های انتقال اطلاعات نوری به عنوان تکنولوژی برتر برای استحکام سیستم‌های انتقال اطلاعات به علت توانایی آن‌ها برای تولید پهنای باند بزرگ، سرعت انتقال سریع و کیفیت کانال بالا شناخته شدند [۱].

مفهوم اساسی یک تقویت‌کننده‌ی نوری، در سال ۱۹۶۲ توسط Geusic وScovil مطرح شد. کمی پس از آن، تقویت‌کننده‌های نوری در سال ۱۹۶۴ توسط E.Snitzer، سپس در شرکت اپتیکی آمریکایی ساخته شد. او یک تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به نئودیمیم را در۱/۰۶ μm نشان داد. فیبر،

یک هسته‌ی μm ۱۰ با یک روپوش ۰/۷۵ تا mm ۱/۵ ، یک طول نوعی m ۱ داشت و از اطراف با یک لامپ پر نور عکاسی که یون‌های نئودیمیم را برانگیخته می‌کند، پوشیده شده بود. انتهای فیبر در یک زاویه‌ای صیقل داده شده بود تا مانع از نوسان لیزر شود. بعد از ظهور فیبرهای شیشه‌ای سیلیکا برای ارتباطات، آن به صورت یک ابتکار جدید حرفه‌ای بسیار مناسب پدیدار شد. Snitzer همچنین اولین لیزرهای شیشه‌ای آغشته به اربیم را نمایش داد.

به طور قابل توجهی، لیزرهای آغشته به خاکهای کمیاب در فرم فیبر کریستالی با قطر کوچک در اوایل دهه‌ی سال ۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت.

اولین نمایش آغشته کردن فیبرهای تک مد به خاک کمیاب در سال ۱۹۸۳ اتفاق افتاد. این کار توسط Broer و Simson و همکارانشان در آزمایشگاههای تلفن بل انجام شد. هدف از این کار، مطالعه‌ی فیزیک مکانیسم‌های واهلش ابتدائی یون‌های خاکی کمیاب در میزبان‌های آمورف (بی‌نظم) بود. تقویت‌کننده‌های فیبر تک مد آغشته به اربیم برای تقویت موج عبوری سیگنال‌های μm ۱/۵ ، به طور همزمان در سال ۱۹۸۷ در دانشگاه Southampton و در آزمایشگاههای AT و T بل توسعه یافتند [۲].

تقویت‌کننده‌های تمام نوری، نقش مهمی را در شبکه‌های تقسیم‌کننده‌ی طول‌موجی (WDM) ایفا می‌کنند. در دهه‌ی گذشته تقویت‌کننده‌های تمام نوری ساخته شده بر اساس پراکندگی رامان [۳و۴] و تقویت‌کننده‌های آلاییده به یون‌های عناصر خاکی کمیاب مانند Nd^{+3}، Pr^{+3}، Tm^{+3} و Er^{+3} [۵و۶]، در خطوط ارتباطی،توسعه و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تقویت‌کننده‌ی رامان با اینکه در هر سیگنالی بهره می‌دهد،اما برای تقویت‌کننده نیازمند پمپ قوی می‌باشد. با هم‌آلاییدگی عناصر خاکی،می‌توان بهره‌ی تقویت‌کننده را تا nm۱۰۰ افزایش داد [۷].

تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم، سیستم‌های ارتباطی فیبر نوری را تغییرات اساسی داده است. بعلاوه آنها به شدت در WDMها مفید هستند زیرا آنها بهره‌ی یکنواختی در محدوده‌ی وسیعی از طول‌موج تولید می‌کنند. EDFA ها بهره‌ای در محدوده‌ی dB ۵۰-۴۰ دارند. بهره به پارامترهای مختلفی بستگی دارد مانند غلظت آلاینده، طول فیبر فعال، توان پمپ، شعاع هسته، شعاع اربیم، روزنه‌ی عددی[4]، توان ورودی سیگنال، پهنای باند سیگنال، طول‌موج پمپ و غیره [۸]. تلاش‌های قابل‌ملاحظه-ای برای درک EDFAها با بهره‌ی مسطح در محدوده‌ی طیفی وسیعی برای WDMهای با ظرفیت بالا

[4] Numerical Aperture

و سیستم‌های ارتباطی نوری اختصاص داده شده است. در نتیجه، پهنای باند بهره‌ی قابل استفاده‌ی EDFA به طور قابل‌ملاحظه‌ای در چند سال گذشته به کمک ترکیبات شیشه‌ای جدید و یا فیلترهای صاف‌سازی بهره افزایش داده شده است. بنابراین یک کنترل فعال برای ثابت نگه داشتن سطح وارونی جمعیت و استفاده از حلقه‌ی فیدبک اپتوالکترونیکی یا حلقه‌ی فیدبک تمام اپتیکی، هموار نگه داشتن بهره را حتی هنگامی که پارامترهای سیگنال ورودی تغییر می‌کند ممکن می‌سازد. به هر حال اغلب EDFAهای با بهره‌ی مسطح تاکنون ساخته شده، مشخصات بهره‌ی مسطحی را تنها برای سطح بهره‌ی قبلاً تعیین شده، تولید می‌کنند. شیب (tilt) بهره‌ی نامعقولی را هنگامی که سطح بهره تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. تلاش‌هایی برای توسعه‌ی محدوده‌ی دینامیکی بهره، تنها با پهنای باند اپتیکی محدود شده‌ی ۱۰ nm، انجام شده است [۹].

روش‌های مختلفی برای صاف‌سازی طیف بهره‌ی EDFA به کار رفته است. روش‌های اولیه‌ای که برای صاف‌سازی به کار برده می‌شد، استفاده از یک ابزار اپتیکی خارجی بود که این روش‌ها هزینه‌ی زیادی را در برداشت. پس از آن روش‌هایی جایگزین شد که نیازی به یک ابزار خارجی نداشت و صاف‌سازی طیف بهره‌ی EDFA به طور ذاتی انجام می‌شود. در این پایان‌نامه به شش روش از این دو نوع صاف‌سازی اشاره شده است.

۱) صاف‌سازی بهره‌ی EDFA با استفاده از شبکه‌های فیبر با دوره‌ی تناوب بلند بر اساس روش قوس الکتریکی: فیلتر صاف‌سازی بهره با استفاده از روش قوس الکتریکی قادر به ساخت EDFA با اعوجاج بهره‌ی پایین برای سیستم‌های WDM تولید شده است. انحراف بهره کمتر از ۳ dB برای سیگنال‌های WDM در محدوده‌ی ۱۵۲۴ nm تا ۱۵۵۱nm (پهنای باند ۲۷ nm) است [۹].

۲) بهینه‌سازی بهره‌ی یک تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم وEDFA با بهره‌ی تقویت‌شده‌ی دو مرحله‌ای با باند مسطح ۴۵ nm در باند L : مدل تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم دو مرحله‌ای با متصل کردن دو EDFA در پیکربندی سری ساخته و همچنین شبیه‌سازی شده است. این، بهره‌ی ۴۶ dB با تغییرات بهره‌ی کمتر از ۲± dB را فراهم می‌کند. محدوده‌ی عملکرد آن ۱۶۱۰–۱۵۶۵ nm است. بنابراین، پهنای باند بزرگی را در محدوده‌ی باند L فراهم می‌کند [۸].

۳) تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم با بهره‌ی صاف شده‌ی فعال در ۳۵ nm با استفاده از فیلتر تنظیم‌پذیر آکوستیکی- اپتیکی : در این، برابرسازی بهره‌ی دینامیکی بسیار انعطاف‌پذیر یک EDFA بر پایه‌ی یک فیلتر فعال تمام اپتیکی با شکل‌های طیف به طور الکترونیکی قابل کنترل به عنوان یک عنصر صاف‌سازی بهره میان مرحله‌ای نشان داده شده است. یک همواری بهره‌ی خوبی (۰/۷ dB>) در محدوده‌ی طول‌موج وسیع (۳۵ nm>) برای محدوده-ی وسیعی از سطوح بهره قابل استفاده و همچنین برای تغییرات سیگنال ورودی و توان پمپ به دست آمده است [۱۰].

۴) بهینه‌سازی بهره‌ی مسطح باند Cی EDFA با استفاده از خمش بزرگ (Macro-Bendeing): خمش بزرگ به عنوان یک روش برای افزایش همواری بهره و پهنای باند EDFA در ناحیه‌ی باند C معرفی شده است. تغییر شعاع خمش و طول فیبر آغشته منجر به شرایط بهینه و شکل بهره‌ی صاف‌تر و پهن‌تر می‌شود. تقویت‌کننده برای یک فیبر آغشته به اربیم با طول ۹ m با ۱۰۰ ppm غلظت یون اربیم و ۶/۵ mm شعاع خمش بهینه شده است. تغییرات بهره‌ی EDFA در حدود ۱± dB روی پهنای باند ۲۵ nm ناحیه‌ی باند C به دست آمد [۱۱].

۵) طراحی جدید یک تقویت‌کننده‌ی فیبر دو هسته‌ای با بهره‌ی ذاتاً مسطح که فقط هسته‌ی خارجی آغشته به اربیم است: در ای روش یک طرح جدید فیبر با بهره‌ی مسطح پیشنهاد می‌شود که شامل دو هسته‌ی هم محور بسیار نامتقارن‌اند و نشان داده می‌شود که طرح پیشنهادی، یک طیف بهره‌ای (۱/۳ dB±) دارد که روی پهنای باند ۴۰ nm (از ۱۵۲۵ nm تا ۱۵۶۵ nm) مسطح شده است [۱۲].

۶) طراحی و ساخت یک تقویت‌کننده‌ی فیبر دو هسته‌ای که فقط هسته‌ی داخلی آغشته به اربیم است: در این روش طراحی و ساخت یک EDFA با بهره‌ی ذاتاً مسطح از طریق بهره‌برداری از جفت‌شدگی تشدیدی مدهای بین دو هسته‌ی بسیار نامتقارن فیبر هم‌محور دو هسته‌ای پیشنهاد شد که تنها هسته‌ی درونی، تا اندازه‌ای با یون‌های Er^{3+} آغشته شده است. بهره‌ی متوسط $28\,dB \leq$ با یک شکل نویز ۶-۴ dB تحت عملکرد کانال چندسیگنالی با ۱۶ کانال سیگنال در باند C نشان داده شد [۱۳].

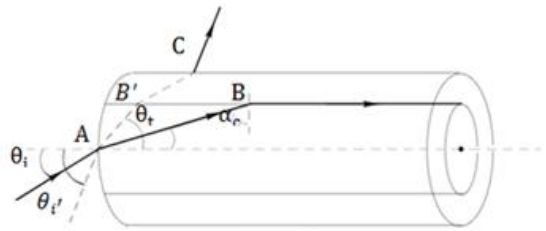
در این پایان‌نامه روشی برای صاف‌سازی بهره استفاده شده که بهره را به صورت ذاتی صاف می‌کند. روش مورد استفاده، روش وردشی نامیده می‌شود که برای کمینه کردن مسئله و بهینه کردن بهره به کار می‌رود. در اینجا مسئله به صورت تحلیلی حل شده است و کمیت‌های مورد نظر به صورت پارامتری به دست آمده‌اند.

فصل دوم

تقویت‌کننده‌های فیبر نوری آغشته
به عناصر خاکی کمیاب

1.2 فیبر نوری

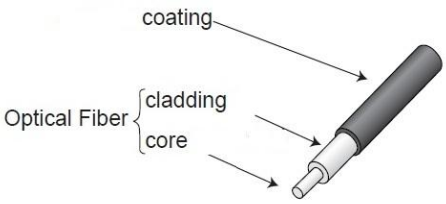
فیبر نوری از یک میله‌ی استوانه‌ای که هسته[5] نامیده می‌شود و جنس آن اغلب از سیلیکات می‌باشد، تشکیل شده است. شعاع استوانه بین دو تا سه میکرون می‌باشد. روی هسته استوانه‌ی دیگری (از همان جنس) که پوشش[6] نامیده می‌شود، قرار دارد. ضریب شکست هسته (n_1) همواره از ضریب شکست پوشش (n_2) بیشتر است. در این نوع فیبرها، نور در اثر انعکاس کلی در فصل مشترک هسته و پوشش، انتشار پیدا خواهد کرد (شکل۱.۲). منابع نوری در این نوع کابل‌ها، دیود لیزری و یا دیودهای ساطع کننده‌ی نور می‌باشند [١٤].



شکل۱،۲ انتشار نور در یک فیبر

نور در برخی از فیبرهای نوری می‌تواند تا دهها کیلومتر انتشار یابد که موضوع بسیار مهمی در صنعت مخابرات است و باید اذعان داشت که هنگام انتشار نور در هسته‌ی فیبر، مقدار کمی افت داریم. به طور کلی فیبرها علاوه بر پوشش، دارای غلاف[7] نیز می‌باشند تا از رطوبت محیط اطراف خود در امان بمانند (شکل۲،۲). فیبرهای به کار برده شده در صنعت مخابرات دارای هسته‌ای با قطر μm ۵ و قطر پوشش μm ۱۲۵ وغلاف آن‌ها دارای قطری در حدود μm ۲۵۰ می‌باشد [۱۵]. نوری که اغلب درون این فیبرها حرکت می‌کند، دارای کمترین میزان افت است. طول موج این نور μm ۱/۵۵ است. چون در فیبرها مقداری از نور درون پوشش منتشر می‌شود، بنابراین پوشش باید دارای افت کم و ضخامت بسیار باشد [١٦].

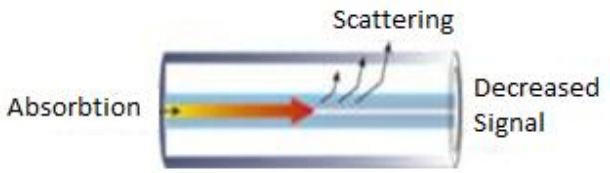
[5] core
[6] cladding
[7] coating



شکل ۲،۲ نمایی از یک فیبر نوری

2.2 لزوم تقویت

سیگنال در طول مسیر انتشار خود در فیبر، به دلیل برخی عوامل دچار تضعیف می‌شود که علت عمده‌ی این تضعیف، وجود برخی ناخالصی‌ها در شیشه می‌باشد. میزان تضعیف سیگنال به درجه‌ی خلوص شیشه‌ی به کار رفته در داخل فیبر و نیز طول‌موج نور منتشر شده در فیبر بستگی دارد. از جمله عوامل تضعیف می‌توان به پراکندگی نور، جذب و خمش در طول فیبر اشاره کرد که بیشتر برای طول‌های بزرگ‌تر از ۶۰۰ km این تضعیف رخ می‌دهد (شکل ۳،۲).



شکل ۳،۲ تضعیف ناشی از پراکندگی وجذب در فیبر نوری

بنابراین از یک تقویت‌کننده‌ی فیبر نوری بین فرستنده و گیرنده استفاده می‌شود تا نور را تقویت کند و در نتیجه برای جبران این اتلاف و انتقال نور در مسیرهای طولانی استفاده می‌شود[۱۷].

1.2.2 تقویت‌کننده‌های فیبر نوری

ابداع تقویت‌کننده‌های اپتیکی منجر به افزایش فاصله‌ی پهنای باند تولیدی سیستم‌های ارتباطی اپتیکی شد. اولین تقویت‌کننده‌های اپتیکی در سال ۱۹۹۰ ساخته شدند.

تقویت‌کننده‌های فیبر نوری وسایل اپتیکی هستند که سیگنال را بدون نیاز به تبدیل آن به سیگنال الکتریکی تقویت می‌کند. این ابزار برای تنظیم افت فیبر نوری حین انتشار سیگنال در طول خط انتقال

در سیستم انتقال نوری به کار می‌روند. این تقویت‌کننده در مخابرات نوری و فیزیک لیزر کاربرد فراوان دارد.

چندین مکانیسم فیزیکی مختلف وجود دارد که می‌تواند برای تقویت سیگنال نور استفاده شود که متناسب با نوع تقویت‌کننده‌های فیبر نوری است. از انواع تقویت‌کننده‌های فیبر نوری می‌توان به تقویت‌کننده‌ی فیبر نوری لیزری، تقویت‌کننده‌ی فیبر نوری نیمه‌رسانا (SOA[8])، تقویت‌کننده‌های فیبر نوری رامان، تقویت‌کننده‌های فیبر نوری آغشته به عناصر خاکی و تقویت‌کننده‌های فیبر نوری پارامتری (OPA[9]) اشاره کرد. در تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته و لیزرهای حجیم ، گسیل خودبه‌خودی در محیط بهره‌ی تقویت‌کننده باعث تقویت نور ورودی می‌شود. در تقویت‌کننده‌های فیبر نوری نیمه-رسانا، بازترکیب الکترون- حفره اتفاق می‌افتد. در تقویت‌کننده‌های فیبر نوری رامان، پراکندگی رامان نور ورودی با فوتون‌ها در شبکه‌ی محیط بهره منجر به تولید همدوسی فوتون با فوتون‌های ورودی می‌شود. تقویت‌کننده‌های پارامتری از تقویت پارامتری استفاده می‌کند [۱۸].

2.2.2تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته شده

تقویت‌کننده‌های فیبر آغشته (DFA[10]) تقویت‌کننده‌های فیبر نوری هستند که از فیبر نوری آغشته به عنوان یک محیط بهره برای تقویت سیگنال نوری استفاده می‌کنند و به لیزرهای فیبر مربوط می‌شوند. لیزر پمپ با لیزر آغشته ترکیب می‌شود و سیگنال از طریق اندرکنش با یون‌های آلاینده[11] تقویت می‌شود. متداول‌ترین مثال، تقویت‌کننده‌ی فیبر آغشته به اربیم (EDFA) است که در آن هسته-ی فیبر سیلیکا با یون‌های اربیم سه ظرفیتی آغشته می‌شود و می‌تواند به طور مؤثری توسط لیزر در طول‌موج ۹۸۰ nm یا ۱٤۸۰ nm پمپ شود و بهره‌ای در ناحیه‌ی ۱۵۵۰ nm را نشان می‌دهد. تقویت توسط گسیل القایی فوتون‌ها از یون‌های آلاینده در فیبر آغشته حاصل می‌شود. لیزر پمپ، یون‌ها را به انرژی بالاتر برانگیخته می‌کند که از آنجا یون‌ها می‌توانند با گسیل القایی فوتون در طول‌موج سیگنال به سطح انرژی پایین‌تر بیایند. یون‌های برانگیخته می‌توانند به طور خودبه‌خود (گسیل خودبه‌خود) یا حتی از طریق فرآیندهای غیرتابشی شامل اندرکنش با فوتون‌های ماتریس شیشه تنزل یابند. این دو مکانیسم فروافت با گسیل القایی رقابت می‌کنند و بازده‌ی تقویت نور را کاهش می‌دهند [۱۹].

---

[8] Semiconductor Optical Amplifier
[9] Optical Parametric Amplifier
[10] Doped Fiber Amplifier
[11] Dopant

3.2 عناصر قلیایی خاکی

خاک‌های کمیاب به دو گروه ١٤ عنصری تقسیم می‌شوند. لانتانیدها با پر شدن لایه‌ی 4f مشخص می‌شوند و با سریوم (Ce) آغاز می‌شوند که عدد اتمی آنها، Z، ٥٨ می‌باشد و با لوتتیوم (Lu) با عدد اتمی ٧١ پایان می‌یابند [٢٠]. دومین عنصر لانتانید در یک لایه‌ی ppm ٤٦، در پوسته‌ی زمین موجود است. اکثریت فیبرهای آغشته به خاک‌های کمیاب با عناصر لانتانید آغشته شده‌اند، برای نمونه اربیم (با عدد اتمی ٦٨) [٢].

آکتنیدها در جدول تناوبی پایین‌تر از لانتانیدها قرار گرفته‌اند. با پر شدن لایه‌ی 5f از توریوم (Z=٩٠) آغاز و به لورنسیم (Z=١٠٣) ختم می‌شوند [٢٠].

به دلیل فعال‌تر بودن لانتانیدها و همچنین رفتار اپتیکی آنها که ناشی از ساختار اتمی خاصشان می‌باشد، در لیزرها و تقویت‌کننده‌ها از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند[٢] . بسیاری از آکتنیدها ایزوتوپ‌های به اندازه‌ی کافی پایدار ندارند که برای چنین وسایلی مفید باشند. از دید ویژگی‌های اپتیکی و الکتریکی، مهمترین مشخصه‌ی خاکهای کمیاب، فشردگی لانتانیدهاست. این نتیجه‌ای از پوشش ناقص توسط الکترون‌های 4f است،که با افزایش عدد اتمی سری لانتانیدها منجر به افزایش در بار هسته‌ای مؤثر می‌شود. در نتیجه الکترون‌های 4f با افزایش عدد اتمی، مقیدتر می‌شوند[٢٠] .

یون‌های خاک‌های کمیاب تاریخ طولانی در کاربردهای اپتیکی و مغناطیسی دارند. در میان آنها، ابزارهای لومینسنت با استفاده از تک‌بلورها، پودرها و شیشه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. عناصر خاکی مشخصات مهمی دارند که آنها را از نظر اپتیکی از دیگر یون‌های فعال متمایز می‌کند.گسیل و جذب آنها در بازه‌های محدودی از طول‌موج می‌باشد. طول‌موج‌های گذارهای گسیل و جذب به مواد میزبان نسبتاً غیرحساس‌اند. شدت این گذارها ضعیف است، طول‌عمر حالت‌های نیمه‌پایدار، بلند است و بازده‌ی کوانتومی تمایل به زیاد بودن دارد، به جز در محلول‌های آبی. تمام این ویژگی‌ها منجر به عملکرد بسیار خوب یون‌های خاک‌های کمیاب در بسیاری از کاربردهای اپتیکی می‌شوند. ابزارهایی که بهره را ایجاد می‌کنند، همچون لیزرها و تقویت‌کننده‌ها باید اتلاف پراکندگی کمی داشته باشند، بنابراین به استفاده از میزبان‌های تک‌بلوری یا شیشه‌ای محدود می‌شویم. چون در بسیاری از کاربردها مواد بلورین به چند دلیل شامل سطح مقطع بیشتر پیک‌ها یا رسانندگی گرمایی بهتر ترجیح داده شده-

اند، تنوع شیشه‌ها و طیف‌های گسیل و جذب پهن‌تری که آنها به وجود می‌آورند منجر به استفاده از شیشه‌های آغشته به خاک‌های کمیاب در کاربردهای زیادی می‌شود[۲۰].

1.3.2تقویت‌کننده‌های فیبر نوری آغشته به خاک‌های کمیاب

توجه اخیر به تقویت‌کننده‌ها و لیزرهای نوری بر مبنای فیبرهای آغشته به خاک‌های کمیاب، نگاه جدیدی را در روش‌های ساخت فیبر به وجود آورده‌اند. استفاده از فیبر نوری برای کاهش توان پمپ مورد نیاز بهره در لیزرها و تقویت‌کننده‌های شیشه‌ای، ابتدا در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ توسط Snitzer و همکارانش ارائه شد؛ در دهه‌ی ۱۹۷۰ توسط Stone و Burrus بررسی شد و از سال ۱۹۸۵ توسط Vigor پیگیری شد. تولد دوباره‌ی این روش اصولاً با کاربرد تقویت‌کننده‌های نوری و لیزرهای فیبر در ارتباطات اپتیکی به وجود آمد. این توجه به همراه قابلیت استفاده از لیزرهای پمپ نیمه‌هادی با توان بالا، تقسیم‌کننده‌های طول‌موج با اتلاف پایین و ایزوله‌کننده‌ها منجر به توسعه‌ی سریع ابزارهای فیبر فعال شده است. توجه به ارتباطات فیبری و کم بودن تضعیف در فیبرهای از جنس سیلیکا، انگیزه‌ی قوی را برای طراحی و ساخت این نوع فیبرها ایجاد کرد. به ویژه قابلیت اتصال اجزای سازنده‌ی فیبر فعال به فیبر ارتباطی دوربرد از جنس سیلیکای آغشته توسط fusion splicing با اتلاف پایین و بازتاب‌پذیری کمتر، اتصال داخلی قابل اطمینان، نوفه‌ی کمتر و تقویت‌کننده‌های با بهره‌ی بالا را باعث می‌شود.

در حال حاضر فیبرهای آغشته به خاک‌های کمیاب با روش‌های متنوعی می‌توانند ساخته شوند. هر یک از این روش‌ها متناسب با نیازهای مختلف، از جمله غلظت‌های بالا در شیشه‌های چندترکیبی تا کمتر از ppm ۱ و اتلاف زمینه‌ی قابل مقایسه با جدیدترین تکنولوژی فیبر ارتباطات، می‌باشد. همه‌ی روش‌های استاندارد برای ساخت فیبر با اتلاف پایین به این توافق رسیده‌اند که شامل خاک‌های کمیاب باشند. موفقیت گسترده‌ی این روش‌های ساخت، منجر به توسعه‌ی سریع لیزرهای فیبر و تقویت‌کننده‌ها برای استفاده‌ی سیستم شد. پیشرفت‌های مداوم، به طور احتمالی روی کنترل محیط ساختاری مواد آلاینده و موقعیت در پروفایل ضریب شکست فیبر متمرکز خواهد شد.

2.3.2 تقویت با استفاده از فیبرهای شیشه‌ای فلورید آغشته به اربیم