

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه کاشان

دانشکده فیزیک

گروه لیزر و فوتونیک

## پایان نامه

جهت اخذ کارشناسی ارشد

در رشته فوتونیک

عنوان:

**طراحی و ساخت تقویت کننده پیوسته توان سیگنال ضعیف با استفاده**

**از فیبرهای دوغلافه آلاییده به ایتريوم**

استاد راهنما: دکتر حمیدرضا زنگنه

استاد مشاور: مهندس محمد جواد حکمت

توسط: نوشین شاطری نژاد

شهریورماه ۹۲

## چکیده

تقویت‌کننده‌های عناصر کمیاب حاکی به علت بهره بالا، کیفیت پرتو خوب، کوچکی و ... در ارتباطات، صنعت و پزشکی کاربردهای متعددی دارند. آغاز استفاده از لیزرهای دیودی توان بالا با درخشندگی زیاد برای پمپ کردن فیبرهای دوغلافه آلاییده با ایتربیوم، منجر به خروجی‌های توان بالا در این تقویت‌کننده‌ها شد. در این پایان‌نامه بررسی‌های تئوری و تجربی در راستای طراحی و ساخت تقویت‌کننده‌ی فیبری پیوسته دو غلافه آلاییده با ایتربیوم، برای سیگنال‌های ورودی ضعیف، انجام شده است. در ابتدا با استفاده از برنامه RP fiber power بررسی‌های لازم برای انتخاب طول موج مورد استفاده در دو لیزر دیودی دمش و سیگنال، مشخصات ظاهری فیبر از جمله ضریب جذب، طول، قطر فیبر و ... مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. همچنین اثرات تغییرات توان سیگنال و دمش بر روی گسیل خودبخودی تقویت شده (ASE) که یکی از عوامل اصلی ایجاد نوفه در این تقویت‌کننده‌ها می‌باشد، مورد بحث قرار گرفته است.

پس از بررسی‌های لازم طرح اولیه‌ای از آن ساخته شد. در این آزمایش ابتدا از لیزر دیودی با پهنای باندی ۰/۵ نانومتر و سپس لیزر دیود سیگنال ۳۰ مگاهرتزی استفاده شد و نتایج بدست آمده با هم مقایسه شد.

در نهایت با انتخاب اجزا مناسب تقویت‌کننده‌ای با پهنای طیفی باریک و حداکثر توان خروجی ۸۰ وات برای سیگنال ورودی ۲۰۰ میلی‌وات حاصل گردید و ضریب بهره نیز ۷۰٪ بدست آمده است.

**کلید واژه :**

پهنای خط باریک، تقویت‌کننده فیبری پیوسته، اثر ASE، ایتربیوم، فیبر دو غلافه

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: تاریخچه تقویت کننده ها
۱-۱	مقدمه
۲-۱	کاربرد لیزرهای فیبری
۸	فصل دوم: مبانی پایه در زمینه ی فیبر نوری مرتبط با ساخت لیزر فیبری
۱-۲	بازتاب نور در فیبرهای نوری
۲-۲	حل معادلات موج در یک فیبر نوری
۳-۲	شکل فیبر
۱-۳-۲	فیبرهای تک غلافی
۲-۳-۲	فیبرهای دو غلافی
۱-۲-۳-۲	بهینه سازی شکل غلاف
۲-۲-۳-۲	فیبرهای دو غلافی پلیمری
۳-۲-۳-۲	فیبرهای با ناحیهی مدی بزرگ LMA
۴-۲	ساختار الکترونی
۱-۴-۲	ایتربیوم
۲-۴-۲	مشخصات اسپکتروسکوپی یون ایتربیوم
۵-۲	اثرات نامطلوب در هنگام کار با این تقویت کننده ها
۱-۵-۲	پدیده خاموشی در لیزرهای آلاییده با ایتربیوم
۲-۵-۲	تابش خودبخودی تقویت شده (ASE)
۳-۵-۲	اثرات غیرخطی در فیبرها
۱-۳-۵-۲	پراکندگی القایی رامان SRS

۲۸	..... ۲-۵-۳-۲-پراکندگی القایی بریلوین SBS
۳۰	..... ۲-۵-۳-۳-مدولاسیون فاز خودی (SPM)، مدولاسیون فاز متقاطع (XPM)
۳۱	..... ۲-۵-۴-جهش مدی
۳۲	..... ۲-۵-۵-تاریکی نور
۳۳	..... ۲-۵-۶-فیوز فیبر
۳۵	..... ۲-۶-آشنایی با قطعات
۳۵	..... ۲-۶-۱-کلاهک انتهایی لیزر فیبری
۳۶	..... ۲-۶-۲-یکسوساز
۳۷	..... ۲-۶-۲-۱-دسته اول ایزولاتورهای وابسته به قطبش
۳۸	..... ۲-۶-۲-۲-دسته ی دوم ایزولاتور های غیر وابسته به قطبش
۳۹	..... ۲-۶-۳-ترکیب کننده
۴۰	..... ۲-۶-۴-برداشتن قسمتی از غلاف
۴۱	..... ۲-۷-۱-اصول کار اتصال دهنده ها
۴۴	..... ۲-۸-۱-اصول جوش قطعات فیبری لیزر فیبری
۴۴	..... ۲-۸-۱-برداشتن روکش فیبر
۴۶	..... ۲-۸-۲-برش انتهایی فیبر
۴۹	..... ۲-۸-۳-قرارگیری و حرکت فیبر داخل دستگاه جوش
۵۳	..... ۲-۸-۴-هیت سینک گذاری در محل های جوش
۵۵	..... فصل سوم: تئوری طراحی تقویت کننده فیبری ایتربیوم
۵۵	..... ۳-۱-معادلات نرخ یون ایتربیوم
۵۷	..... ۳-۲-اثر توان سیگنال ورودی بر سیگنال خروجی
۵۸	..... ۳-۳-بررسی میزان تاثیر توان سیگنال بر توان ASE
۶۰	..... ۳-۴-بررسی میزان تاثیر توان پمپ بر توان ASE

۶۴	..... ۳-۵- طول موج لیزر دیود
۶۷	..... ۳-۵-۱- مقایسه و بررسی شماتیک های مختلف پمپ
۶۸	..... ۳-۵-۲- بررسی بازدهی در شماتیک های مختلف
۶۹	..... ۳-۶- اثر اندازهی قطر هسته و غلاف فیبر
۷۲	..... ۳-۷- محدودیت های وارد شده
۷۴	..... فصل چهارم: نتایج تجربی
۷۴	..... ۴-۱- چیدمان آزمایشگاهی
۷۶	..... ۴-۱-۱- انتخاب ایزولاتور
۷۷	..... ۴-۱-۲- انتخاب لیزر دیود
۷۷	..... ۴-۱-۲-۱- انتخاب لیزر دیود پمپ
۷۹	..... ۴-۱-۲-۲- انتخاب لیزر دیود سیگنال
۸۱	..... ۴-۱-۳- انتخاب فیبر نوری محیط فعال
۸۴	..... ۴-۲- اتصال قطعات فیبری به یکدیگر
۸۵	..... ۴-۳- نرخ بهره
۸۷	..... نتیجه گیری
۸۸	..... پیشنهادات ادامه کار
۸۹	..... مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمودار رشد توان خروجی از لیزرهای فیبری تا سال ۲۰۰۶ [۹]..... ۴
- شکل ۱-۲: مقایسه یک کاواک لیزری توده ای (بالا) و یک کاواک لیزری فیبری (پایین) [۱۳]..... ۵
- شکل ۱-۳: تحول خروجی توان برای لیزرهای  $Co_2$ ،  $YAG$ ،  $ND$  و لیزرهای  $YB$  تا سال ۲۰۱۰ [۷]..... ۷
- شکل ۲-۱: نور با توجه به روزنه ی عددی فیبر با زاویه  $A$  وارد هسته می شود و تحت همان زاویه نیز از فیبر خارج می شود..... ۹
- شکل ۲-۲: مقایسه شکل مد پایه درون فیبر با پرتو گوسی که در محیط های غیر فیبری انتشار می یابد [۱۷]..... ۱۰
- شکل ۲-۳: شکل پرتوی مدهای مختلف درون فیبر از حل معادله موج در مختصات استوانه ای [۷]..... ۱۱
- شکل ۲-۴: نمایش شماتیکی از پروفایل ضریب شکست و دو مد آن [۸]..... ۱۱
- شکل ۲-۵: نمونه ای از یک فیبر دو غلافی..... ۱۳
- شکل ۲-۶: تصویر پرتوهای حلزونی در سطح مقطع فیبر برای شکلکهای مختلف [۱۸]..... ۱۵
- شکل ۲-۷: نمودار جذب ۳ سطح مقطع متفاوت [۲۱]..... ۱۶
- شکل ۲-۸: اتلاف خم برای فیبری با  $NA=0.06$  [۱]..... ۱۸
- شکل ۲-۹: پروفایل تقویت کننده فیبری ایتربوم LMA برای دو فیبر پیچیده شده و پیچیده نشده [۱]..... ۱۹
- شکل ۲-۱۰: افزایش چشمگیر توان خروجی با روی کار آمدن فیبرهای LMA در سالهای اخیر [۱]..... ۱۹
- شکل ۲-۱۱: تابع موج شعاعی برای یون  $Ce^{+3}$  [۲]..... ۲۰
- شکل ۲-۱۲: طیف طول موجی که هر یک از یون های عناصر خاکی کمیاب می توانند تولید کنند [۲]..... ۲۱
- شکل ۲-۱۳: نمونه از گذار بین زیر لایه های تراز حالت برانگیخته و حالت پایه لیزر آلاییده با یون ایتربوم در دو طول موج لیزر ۱۰۳۰ و ۱۰۵۰ نانومتر و جذب در طول موج پمپ ۹۴۰ نانومتر..... ۲۲
- شکل ۲-۱۴: سطح مقطع جذب و گسیل ایتربوم در میزبان سیلیکا ژرمانیوم [۲۱]..... ۲۳
- شکل ۲-۱۵: سطح مقطع جذب در میزبان سیلیکا ژرمانیوم که مقادیر جذب در طول موج اطراف ۱۰۳۰ نانومتر و ۱۰۸۰ نانومتر به صورت واضح تر نشان داده شده است [۵]..... ۲۴
- شکل ۲-۱۶: طیف پراکندگی رامان..... ۲۷
- شکل ۲-۱۷: چگونگی پراکندگی القایی بریلوئن در یک فیبر نوری..... ۲۹
- شکل ۲-۱۸: شباهت فیوز فیبر و آتش گرفتن علفزار. انرژی خارج شده توسط فلش ها نشان داده شده [۳۴]..... ۳۳

- شکل ۲-۱۹: سطح انتهایی فیبر آسیب دیده، ذرات روشن مایع استفاده شده برای پرداخت است. ۳۴
- شکل ۲-۲۰: سطح انتهایی فیبر تمیز که توسط برش فیبری به وجود آمده. ۳۴
- شکل ۲-۲۱: فیوز فیبر در یک فیبر دو روکشه آلاینده با ایتربیوم. ۳۵
- شکل ۲-۲۲: انتهای فیبر فیوز شده [۳۵]. ۳۵
- شکل ۲-۲۳: یک فیبر با دو کلاهک انتهایی در ابتدا و انتهای آن [۲۱]. ۳۶
- شکل ۲-۲۴: چگونگی یکسوسازی. ۳۷
- شکل ۲-۲۵: عملکرد ایزولاتور های غیر وابسته به قطبش. ۳۸
- شکل ۲-۲۶: شماتیک یک ترکیب کننده با چندین فیبر ورودی و یک فیبر خروجی [۳۸]. ۳۹
- شکل ۲-۲۷: چگونگی جفتشدگی لیزر دیودهای پمپ و سیگنال در ترکیب کننده. ۴۰
- شکل ۲-۲۸: در شکل اول پرتو از هسته کوچک وارد هسته بزرگتر شده و اتلاف نداریم در شکل دوم بخشی از پرتو نمی تواند وارد هسته شود. ۴۲
- شکل ۲-۲۹: ناهمراستایی محوری. ۴۲
- شکل ۲-۳۰: ناهمراستایی زاویه ای. ۴۳
- شکل ۲-۳۱: نحوه برداشتن بافر با استفاده از روش مکانیکی [۴۱]. ۴۵
- شکل ۲-۳۲: جای گیری فیبر در شیار ۷ شکل وجود کوچکترین غباری در شیارها سبب به وجود آمدن ناراستایی می شود [۴۱]. ۴۷
- شکل ۲-۳۳: فرآیند برش انتهایی فیبر [۴۱]. ۴۷
- شکل ۲-۳۴: انواع برش های غیر صحیح. ۴۸
- شکل ۲-۳۵: نمودار وابستگی میزان تنش اعمالی در حین فرآیند برش به قطر فیبر [۴۳]. ۴۹
- شکل ۲-۳۶: محل قرارگیری فیبرها در دستگاه جوش [۴۱]. ۵۰
- شکل ۲-۳۷: همراستا کردن محل قرار دادن فیبرها (روش غیر اتوماتیک) [۴۱]. ۵۱
- شکل ۲-۳۸: روش PAS همراستا سازی فیبرها بر اساس پروفایل فیبرها و پردازش تصویر. [۴۱]. ۵۲
- شکل ۲-۳۹: یک سیستم ساده شده LID. [۴۱]. ۵۳
- شکل ۲-۴۰: نمونه از گرم شدن محل جوش. به خاطر اتلاف در محل جوش بخش از توان به صورت گرما تلف می شود که این خود سبب گرم شدن محل جوش می گرد [۴۴]. ۵۳
- شکل ۳-۱: شماتیک تقویت کننده [۲۱]. ۵۶
- شکل ۳-۲: توان خروجی سیگنال به توان ورودی با توان پمپ ۲۰W. ۵۸
- شکل ۳-۳: توان ASE رو به جلو برای سیگنال های مختلف در توان پمپ ثابت ۲۰W. ۵۹
- شکل ۳-۴: توان ASE رو به عقب برای سیگنال های مختلف در توان پمپ ثابت ۲۰W. ۵۹



- شکل ۳-۵: توان ASE روبه جلو و عقب و وارونگی جمعیت در نبود سیگنال ورودی برای پمپ ۲۰W ..... ۶۱
- شکل ۳-۶: توان ASE روبه جلو و عقب و وارونگی جمعیت در نبود سیگنال ورودی برای پمپ ۴۰W ..... ۶۱
- شکل ۳-۷: توان ASE رو به جلو برای پمپ های مختلف در توان سیگنال ثابت ۵۰MW ..... ۶۲
- شکل ۳-۸: توان ASE رو به عقب برای پمپ های مختلف در توان سیگنال ثابت ۵۰MW ..... ۶۳
- شکل ۳-۹: مقایسه میزان ASE رو به جلو و عقب ..... ۶۳
- شکل ۳-۱۰: نمودار سطح مقطع القایی فیبر مورد استفاده در شبیه سازی [۱۹] ..... ۶۴
- شکل ۳-۱۱: جذب در طول موج های مختلف در طول فیبر ..... ۶۵
- شکل ۳-۱۲: طول بهینه برای پمپ در طول موج های مختلف ..... ۶۶
- شکل ۳-۱۳: طول بهینه برای توان پمپ های مختلف ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۴: توان سیگنال در شماتیک های مختلف و یکسان بودن طول بهینه ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۵: نرخ بهره برای شماتیک های مختلف ..... ۶۹
- شکل ۳-۱۶: جذب پمپ برای قطر های مختلف ..... ۷۰
- شکل ۳-۱۷: تغییرات طول بهینه و توان خروجی با ضریب جذب [۴۸] ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۸: نمودار دما بر حسب طول در ضریب جذبهای مختلف [۴۹] ..... ۷۲
- شکل ۳-۱۹: اثر افزایش طول بر آستانه ی بریلوئن [۵۰] ..... ۷۳
- شکل ۳-۲۰: آستانه ی SBS بر حسب پهنای باندهای لیزر [۵۰] ..... ۷۳
- شکل ۴-۱: شماتیک تقویت کننده در حالت تجربی ..... ۷۵
- شکل ۴-۲: عکسی از چیدمان آزمایشگاهی تقویت کننده ..... ۷۵
- شکل ۴-۳: مقایسه ASE رو به جلو و عقب ..... ۷۶
- شکل ۴-۴: تغییرات تجربی شدت در سیگنال ثابت ۳۰ MW و توان های مختلف پمپ ..... ۷۸
- شکل ۴-۵: تغییرات تجربی شدت در سیگنال ثابت ۲۰۰ MW و توان های مختلف پمپ ..... ۷۹
- شکل ۴-۶: تغییرات تجربی شدت در سیگنال های مختلف با توان پمپ ثابت ۲۲W و لیزر دیود سیگنال با پهنای طول موجی ۰.۵nm ..... ۸۰
- شکل ۴-۷: تغییرات تجربی توان سیگنال ورودی در پمپ ۲۱W با استفاده از لیزر دیود سیگنال با پهنای فرکانسی ۳۰MHz ..... ۸۱
- شکل ۴-۸: فیبری با سطح مقطع هشت گوش ..... ۸۲
- شکل ۴-۹: مناطق هیت سینک گذاری شده در کار ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۰: نمودار تجربی مقایسه پمپ جذب نشده در دماهای مختلف ..... ۸۴

شکل ۴- ۱۱: جوش دو فیبر همجنس آلائیده با ایتربوم ۲۰/۴۰۰. در این جوش محل جوش به سختی قابل تشخیص است ..... ۸۵

شکل ۴- ۱۲: جوش دو فیبر غیر همجنس آلائیده ۲۰/۴۰۰. در این نوع جوش یک خط تیره در محل پیوندگاه ایجاد می شود اما این خط اتلاف به حساب نمی آید..... ۸۵

شکل ۴- ۱۳: نرخ بهره در تجربه ..... ۸۶

شکل ۴- ۱۴: مقایسه نرخ بهره تئوری و تجربی ..... ۸۶

## فصل اول: تاریخچه تقویت کننده ها

### ۱-۱- مقدمه

لیزرها و تقویت کننده‌ها بر اساس تابش القایی، مفهومی که برای اولین بار توسط آلبرت انیشتن در سال ۱۹۱۶ بیان شد و سال ۱۹۵۴ توسط تانز<sup>۱</sup> سازنده‌ی میزر، نشان داده شد، پایه‌گذاری شد. ۶ سال بعد از تانز، میمن<sup>۲</sup> توانست لیزر را اختراع کند. در لیزر محیط فعالی وجود دارد که در آن یک الکترون از حالت پایه به برانگیخته و انرژی بالاتر می‌رود. انرژی فوتون ساطع شده، برابر با اختلاف دو تراز می‌باشد. الکترون به گونه‌ای القا می‌شود که به تراز پایین‌تر بیاید و دومین فوتون را ساطع کند که در فاز، انرژی و فرکانس همانند فوتون اولیه می‌باشد. تداخل سازنده این فوتون‌ها منجر به تقویت می‌شود. اگر الکترون چندین بار برانگیخته شود و کاواک موجود باشد که فوتون‌ها رفتار رفت و برگشتی داشته باشند، تقویت کننده ما به لیزر تبدیل می‌شود. لیزرهای آلاییده به لانتانیدها در میانه‌ی دهه‌ی ۱۹۶۰ همزمان با ساخت خود لیزر اختراع شد. ولی پیچیدگی‌های آن‌ها مانع از استفاده کاربردی‌شان گردید [۱]. ایده‌ی استفاده از فیبرها به عنوان موجبرهای استوانه‌ای توسط اسنیتزر<sup>۳</sup> در اوایل دهه ۱۹۶۰ مطرح شد و این تئوری همراه با پیشرفت‌های ساخت در دهه‌ی ۱۹۷۰ با روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی<sup>۴</sup>، منجر به فیبرهای تک‌مد کم اتلاف برای انتقال اطلاعات شد. قبلاً از فیبرها تنها در انتقال اطلاعات در مسافت‌های کوتاه و آندوسکوپی استفاده می‌شد.

---

<sup>۱</sup>Townes

<sup>۲</sup>Maiman

<sup>۳</sup>Snitzer

<sup>۴</sup>Chemical vapor

اولین لیزر فیبری که در سال ۱۹۶۱ ساخته شد، توسط یک فلش لامپ پمپ شد و از نئودیموم به عنوان آلاینده آن استفاده شد. تغییر پمپ از فلش لامپ به لیزرهای حالت جامد در اوایل دهه‌ی ۶۰ صورت گرفت که توسط یک لیزر دیود انجام شد. جولیان استون<sup>۱</sup> و چارلز بوروس<sup>۲</sup> لیزر آلاینده بانئودیموم را با پمپ لیزر دیود، همزمان با پیشرفت لیزرهای نیم‌رسانا دیودی GaAs، در سال ۱۹۷۴ نشان دادند. ولی به علت مشکلات عملکرد در دمای اتاق تا دهه‌ی ۱۹۸۰ مورد کاربرد قرار نگرفت.

لیزرهای دیودی و فیبرهای اربیموم که اساس تقویت‌کننده‌های اپتیکی شدند، در سال ۱۹۸۷ به کار گرفته شدند. اولین تقویت‌کننده فیبری آلاینده با اربیموم<sup>۳</sup> (EDFA) توسط یک dye لیزر در طول-موج ۶۶۰ نانومتر پمپ شد، که بهره‌ی ۲۰ دسی بل برای ۲۰ میلی‌وات توان پمپ جذب‌شده را نشان می‌داد [۲]. لیزرهای فیبری در برابر Nd/YAG و لیزرهای گازی مقام دوم را داشتند و جز در موارد خاص از آن‌ها استفاده نمی‌شد. در آن زمان تنها تکنیک موجود برای رسیدن کیفیت بالای پرتو خروجی، استفاده از فیبرهای با هسته کوچک (در حد میکرون) بود. بنابراین جفت‌شدگی درون این هسته‌های کوچک منجر به خروجی تنها در حد میلی‌وات می‌شد.

با اختراع پمپ از غلاف فیبر نوری در سال ۱۹۸۸ محدودیت‌های لیزرها و تقویت‌کننده‌های فیبری کمتر شد [۳]، تا جایی که در سال ۱۹۹۹ منجر به اولین لیزر فیبری پیوسته<sup>۴</sup> با خروجی بالای ۱۰۰W گردید [۴].

از سال ۱۹۸۵ که تقویت‌کننده آلاینده اربیموم اختراع شد، به علت توانایی تجاری آن در زمینه‌ی تکنولوژی ارتباطات، توجه زیادی را به خود جلب کرد. استفاده از این تقویت‌کننده‌ها تنها منجر به ارتباطات راه دور نشد، بلکه ویژگی تقویت پالس‌ها برای منابع با توان بالا را به همراه داشت. اما برای رسیدن به چگالی توان بالا نمی‌توان فیبرهای با آلاینده اربیموم استفاده کرد زیرا چگالی بالا به فیبر آسیب می‌رساند. به همین علت در تولید توان‌های بالا به لیزرهای فیبری با آلاینده نئودیمیم و ایتربیموم توجه شد. توانایی تقویت باند بلندی از طول‌موج‌ها در ایتربیموم از ۹۷۵ تا ۱۲۰۰ نانومتر باعث توجه چشمگیری به این یون کمیاب خاکی شد.

---

<sup>۱</sup> Julian Stone

<sup>۲</sup> Charles Burrus

<sup>۳</sup> Erbium doped fiber amplifier

<sup>۴</sup> CW, continues wave

علاوه بر پهنای باند، بهره گسترده، توان خروجی بالا و بهره توان تبدیل عالی در ایتربوم مورد توجه قرار گرفت. نداشتن پیچیدگی‌های تقویت‌کننده‌های اربوم از جمله جذب حالت برانگیخته<sup>۱</sup> و خاموشی<sup>۲</sup> توسط انرژی داخلی و داشتن امکان آلایدیگی بالا، منجر به استفاده از طول‌های کوتاه فیبر با بهره زیاد شد [۵]. اولین تقویت‌کننده‌های فیبری با آلایدیگی ایتربوم توسط ایتزل، گراندی و گینتزر گزارش شد [۶]. در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ پیشرفت تکنولوژی دیگری منجر به پیشرفت توان قله لیزرهای فیبری شد. در این زمان راه‌حلی برای هسته‌ی کوچک فیبرهای اپتیکی که ایجاد شدت بالا درون هسته می‌کرد و عواقب آن پایین آمدن آستانه‌ی غیرخطی بود، پیدا شد که عملکرد تک‌مدی در فیبرهای چندمدی با استفاده از افزایش قطر هسته و در نهایت افزایش آستانه‌ی پدیده‌های غیرخطی بود [۷]. استفاده از فیبرهای LMA<sup>۳</sup> با قطر هسته بزرگ و روزنه‌ی عددی کوچک و پمپ از غلاف دوم منجر به خروجی‌های توان بالا در حد کیلووات شد. بر خلاف موفقیت چشمگیر فیبرهای اپتیکی در ارتباطات، تحول آن‌ها در قرن ۲۱ آشکار شد. زمانی که امکان استفاده لیزرهای دیودی توان بالا با درخشندگی بالا برای پمپ کردن فیبرهای دو غلافه آلایده با یون‌های کمیاب خاکی، شروع شد. در این هنگام مسابقه‌ی توان بالا و انرژی‌های بالا آغاز گردید [۸].

امروزه دو لیزر YAG و CO<sub>2</sub> توانایی ایجاد توان خروجی پیوسته از زیر وات تا بالای چند کیلووات را دارند، بنابراین به عنوان لیزرهای پیشقدم در جوش و برش باقی مانده‌اند. ولی بر خلاف تمام این مزایا دارای بهره wall plug efficiency (۱۰٪) پایین و کیفیت پرتو نسبتاً ضعیف می‌باشند. در جهت دیگر پیشرفت‌ها در تکنولوژی لیزر دیود، طرح فیبر و تکنیک جفت شدگی پرتوها منجر به جذابیت چشمگیر لیزرهای فیبری آلایده با ایتربوم با دمش از غلاف<sup>۴</sup> که بهره (۲۰٪ تا ۴۰٪) توان خروجی بالا و کیفیت پرتو بالا برای کاربردهای مختلف دارند، شد.

تکنولوژی فیبرهای LMA و تغییرات فیبرهای اولیه به صورت استاندارد منجر به ساخت ادوات با توان بالا شد. در نتیجه لیزرها و تقویت‌کننده‌های آلایده با ایتربوم در جدال با لیزرهای حالت جامد و گازی در دو زمینه‌ی صنعتی و نظامی، پیشی گرفتند. همچنین تحول فیبرهای

---

<sup>۱</sup> Excited state absorption

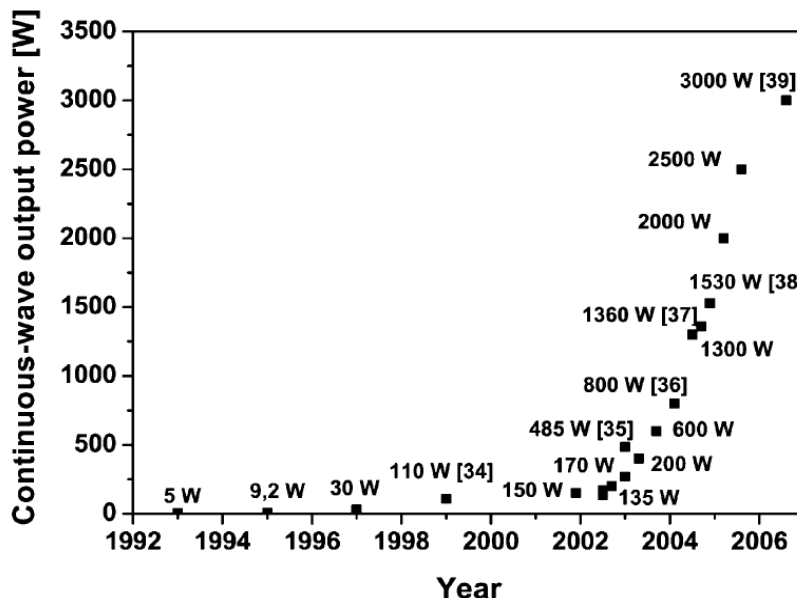
<sup>۲</sup> quenching

<sup>۳</sup> Large mode area

<sup>۴</sup> Cladding pump fibers

LMA/ایتریوم و LMA تولیوم موجب پیش‌بینی لیزرها و تقویت‌کننده‌های توان بالا در محدوده‌ی ایمن چشم از ۱.۵ تا ۲ میکرومتر شدند.

در شکل (۱-۱) رشد لیزرهای فیبری پیوسته در طی سالهای اخیر نشان داده شده است .



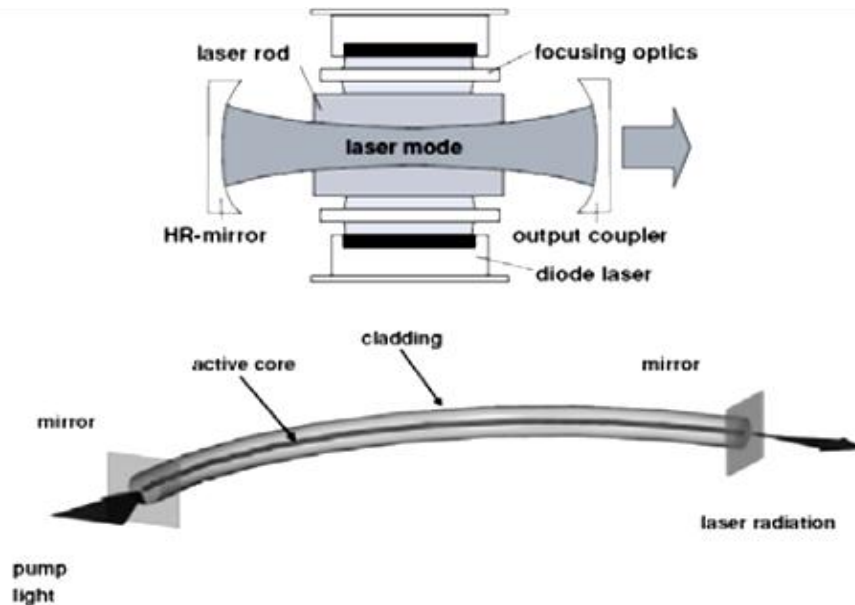
شکل ۱-۱: نمودار رشد توان خروجی از لیزرهای فیبری تا سال ۲۰۰۶ [۹]

تقویت‌کننده‌های فیبری، تقویت‌کننده‌های اپتیکی هستند که در آن فیبر آلاینده با یکی از عناصر، نقش محیط بهره را دارد و سیگنال را تقویت می‌کند. پرتو پمپ در فیبر وارد شده بنابراین یون‌های آلاینده از حالت پایه به تراز برانگیخته می‌روند. سیگنال انتشار یافته در این تقویت‌کننده‌ها می‌تواند با یون‌های برانگیخته برخورد کند سپس توسط تابش القایی، تقویت شود. در این حالت ما می‌توانیم تابش خودبخودی و یا فرایند غیرتابشی که فونون آزاد می‌کند، نیز داشته باشیم. که این دو فرایند در تقویت‌کننده‌های آلاینده، میزان بهره را کاهش می‌دهند. تابش خودبخودی یکی از اصلی‌ترین عوامل ایجاد نویز ما می‌باشد [۱۰]. البته تابش خودبخودی القایی در تقویت‌کننده‌های توان بالا چندان موثر نمی‌باشد [۱۱].

## ۱-۲- کاربرد لیزرهای فیبری

لیزرهای فیبری دارای امتیازاتی نسبت به لیزرهای کریستالی توده‌ای هستند که برخی از آنها عبارتند از: لیزرهای فیبری دارای حجم کم‌تر، سبک‌تر و دارای بازدهی بیش‌تری هستند. در لیزرهای فیبری دو غلافی، بازدهی تبدیل پمپ می‌تواند به بزرگی ۸۰ درصد باشد. چیدمان لیزرهای فیبری نیاز به المان‌های اپتیکی و اپتو مکانیکی کم‌تری دارد و این امر باعث شده است که نسبت به لیزرهای توده‌ای ارزان‌تر بوده و راحت‌تر بتوان با آنها کار کرد [۱۲].

لیزرهای فیبری شیشه‌ای آلاییده، در مقایسه با لیزرهای کریستالی آلاییده، دارای پهنای باند تقویت بزرگی هستند. در نتیجه این لیزرها می‌توانند کوک‌پذیری<sup>۱</sup> طول‌موجی نسبتاً بالایی را فراهم آورند. به‌علاوه پالس‌های نوری نسبتاً کوتاه را نیز می‌توان با استفاده از این لیزرها تولید کرد. لیزرهای فیبری به علت توانایی در کنترل مد انتشار یابنده در داخل کاواک و کنترل اثرات حرارتی می‌توانند دارای کیفیت پرتو بهتری نسبت به لیزرهای شیشه‌ای توده‌ای باشند [۱۳].



شکل ۱-۲: مقایسه یک کاواک لیزری توده‌ای (بالا) و یک کاواک لیزری فیبری (پایین) [۱۳]

<sup>۱</sup>tunability

برنامه‌های سرمایه‌گذاری شده در بخش نظامی برای انرژی سلاح‌ها نیز نقش بزرگی در دستیابی توان‌های بالا در لیزرهای فیبری داشته است. ابتدا شروع کار در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ انرژی این سلاح‌ها توسط لیزرهای حالت جامد، سپس لیزرهای گازی، در دهه‌ی ۱۹۷۰ از لیزرهای شیمیایی و در دهه‌ی ۱۹۸۰ لیزرهای پرتو ایکس، بوده است [۱۴].

از جمله کاربردهای لیزرهای فیبری در بخش نظامی می‌توان به مسافت یابی<sup>۱</sup>، دریافت از راه دور و حفاظت و امنیت اشاره کرد. لیزرهای فیبری به علت کوچک‌بودن و قابلیت ساطع کردن پالس‌های فمتوثانیه با توان‌قله‌بالا به عنوان جایگزینی برای لیزرهای قبلی برای مسافت‌یابی شده‌اند. یکی از موارد استفاده از لیزرهای فیبری آلاینده با اربیم در لیدارها می‌باشد [۱۵]. همچنین از لیزرهای فیبری آلاینده با تولیوم در دریافت از راه دور استفاده می‌شود. لیزرهای آلاینده با دو یون اربیم/ایتربیوم توانایی آشکارسازی و مکان‌یابی اختلالات را در بخش امنیت دارند.

در صنعت لیزرهای فیبری دارای کاربردهای متنوعی در پردازش مواد، مخابرات، طیف‌سنجی و پزشکی دارا می‌باشند [۷]. مزیت‌های لیزر فیبری نسبت به سایر لیزر در صنعت عبارتند از:

- نور همیشه داخل یک فیبر قابل انعطاف جفت می‌شود که می‌توان آن را به یک کانونی‌کننده متحرک متصل کرد. این ویژگی به خصوص در برش و جوش لیزری بسیار مهم می‌باشد.
- توان خروجی بالا: با توجه به ضریب تقویت بالا در محیط‌های فیبری و موجبری، می‌توان توان‌های از مرتبه کیلووات نیز با این لیزرها تولید کرد.
- کیفیت پرتو بالا: مشخصات موجبری فیبرهای نوری، اعوجاج گرمایی در مسیر پرتو را کاهش یا به طور کامل از بین می‌برد و لذا منجر به پرتوهای نوری با کیفیت پرتو بالا و محدود به پراش می‌شوند.
- اندازه کوچک لیزرهای فیبری: لیزرهای فیبری در مقایسه لیزرهای دیگر گازی و حالت جامد با توان مشابه، دارای حجم بسیار کمتری می‌باشد. زیرا می‌توان فیبر محیط فعال را به دور پیچه‌هایی با قطر مشخص پیچاند تا فضای کمتری اشغال کنند.

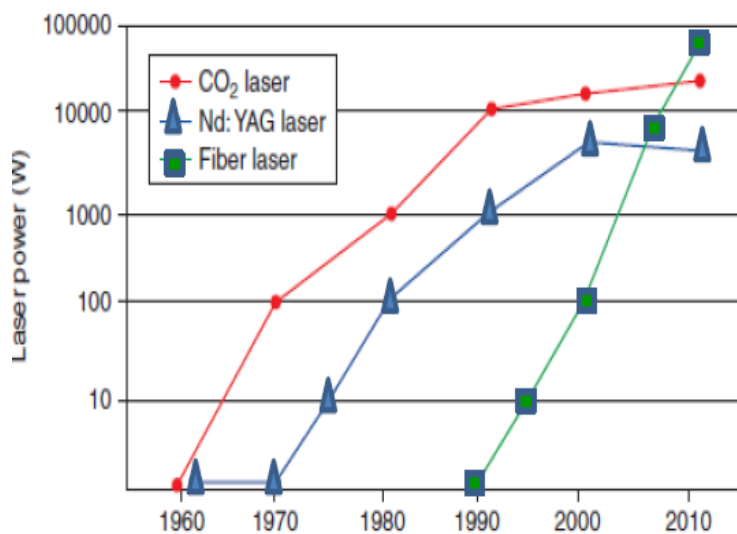
---

<sup>۱</sup>Rang finding



- قابلیت اطمینان کار بالا: لیزرهای فیبری از نوع تمام فیبری دارای پایداری بالایی در برابر ارتعاشات می‌باشند. همچنین علاوه بر اینکه طول عمر بالایی دارند، در طول این مدت نیاز به نگهداری نیز ندارند.
- بازدهی بالا: لیزرهای فیبری دارای بازدهی نوری متوسط ۵۰ درصد به بالا می‌باشند. این در حالی است که لیزرهای مشابه دارای بازدهی زیر ۱۰ درصد می‌باشند. افزایش بازدهی وسایل مورد استفاده در صنعت سبب کاهش مصرف انرژی و در نتیجه افزایش بهره‌وری می‌شود.

شکل (۳-۱) نموداری از تغییرات توان لیزر و سرعت رشد آن‌ها را از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: تحول خروجی توان برای لیزرهای CO<sub>2</sub>، Nd:YAG و لیزرهای Yb تا سال ۲۰۱۰ [۷]

## فصل دوم: مبانی پایه در زمینه ی فیبر نوری مرتبط با ساخت لیزر فیبری

در این فصل در ابتدا به بیان مقدمه اجمالی در زمینه نحوه انتشار نور در فیبرهای نوری می پردازیم و در ادامه ویژگی های اصلی یون ایتربیوم را مورد بررسی قرار می دهیم. همچنین به بررسی مسائل محدودکننده در جهت ساخت تقویت کننده های تمام فیبر، مانند مکانیزم های آسیب به فیبرهای نوری و اثرات غیرخطی محدودکننده می پردازیم. سپس به معرفی قطعات مورد استفاده و اصول جوش قطعات فیبری می پردازیم. هدف اصلی از ارائه این فصل بیان نکات تکنیکی است که در ساخت تقویت کننده فیبری مورد استفاده قرار می گیرد.

### ۲-۱- بازتاب نور در فیبرهای نوری

به طور معمول یک فیبر شامل یک هسته است که اطراف آن را غلاف احاطه کرده است. بین هسته فیبر و غلاف آن هیچ فاصله آزادی وجود ندارد. در مرز هسته و غلاف یک فیبر با ضریب شکست پله ای برای یک پرتو با زاویه ورودی  $\theta_i$  و زاویه بازتاب شده  $\theta_r$ ، قانون اسنل برقرار می باشد.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \quad (2-1)$$

که در رابطه ی (۲-۱)،  $n_1$  و  $n_2$  بیانگر ضریب شکست هسته و غلاف می باشند. برای زاویه بزرگتر از زاویه بحرانی  $\varphi_c$  رابطه زیر را داریم:

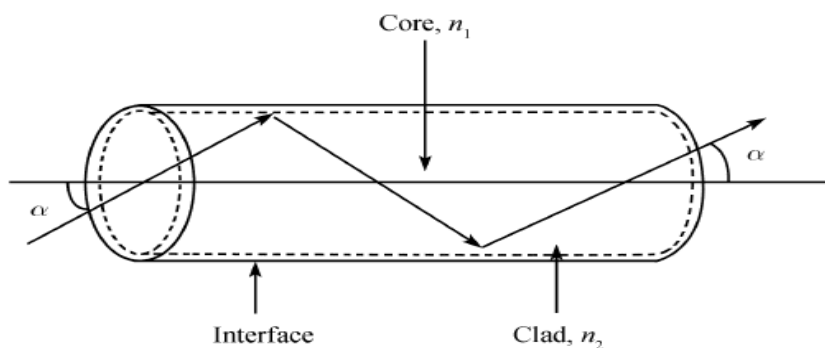
$$\sin \varphi_c = n_2/n_1 \quad (2-2)$$

این وضعیت زمانی اتفاق می افتد که پرتوها بازتاب کلی را در مرز هسته و غلاف تجربه کنند. روزنه ی عددی با رابطه (۲-۳) تعریف می شود:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-3)$$

زمانی که فیبر نوری خم شود زاویه بازتاب یک پرتو در مرز هسته و غلاف به  $\varphi = \varphi + 1/\epsilon$  تغییر می‌کند. بنابراین زاویه بازتاب پرتوها در محل خمش بزرگتر از زاویه بحرانی خواهد بود و پرتوها از این نقطه نشت می‌کنند، به این اتلاف، اتلاف خمشی می‌گویند. زاویه  $\alpha$ ، که نور از فیبر خارج می‌شود توسط رابطه‌ی (۲-۴) با روزنه‌ی عددی رابطه دارد.

$$NA = \sin \alpha \quad (۲ - ۴)$$



شکل ۲-۱: نور با توجه به روزنه‌ی عددی فیبر با زاویه  $\alpha$  وارد هسته می‌شود و تحت همان زاویه نیز از فیبر خارج می‌شود.

## ۲-۲- حل معادلات موج در یک فیبر نوری

انتشار میدان الکترومغناطیس در فیبرهای نوری با معادلات ماکسول توصیف می‌گردد. برای یک محیط نارسانا بدون بارهای آزاد، این معادله به یک معادله عمومی موج (۲-۵) برای انتشار نور در فیبرهای نوری تبدیل می‌شود [۱۶]:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} \quad (۲ - ۵)$$

که در آن  $\mathbf{E}$  و  $\mathbf{P}$  به ترتیب بردارهای میدان الکتریکی و قطبش ناشی از میدان می‌باشند. سرعت نور در خلا نیز به صورت  $c = (\mu \cdot \epsilon)^{-1/2}$  تعریف می‌شود. با حل معادله موج با شرایط مرزی مناسب در مقیاس استوانه‌ای می‌توان به مدهای عرضی داخلی فیبر که با گذشت زمان تغییر

نمی‌کنند، دست یافت. تعداد نهایی مدهای انتشار یافته درون فیبر با عدد  $V$  در رابطه‌ی (۲-۶) نشان داده می‌شود [۱۶].

$$V = k_0 a NA < u_m \quad (۲ - ۶)$$

که در آن  $u_m$  ریشه  $m$ ام تابع بسل مرتبه اول  $J_m(u)$  می باشد. اولین ریشه آن  $۲.۴۰۵$  می‌باشد.

$$۰ < V < ۲.۴۰۵ \quad (۲ - ۷)$$

زمانی که یک فیبر نوری با شرایط رابطه‌ی (۲-۷) طراحی شود، هسته فیبر نوری تنها به یک مد  $HE_{۱۱}$  اجازه انتشار در فیبر را می‌دهد و اصطلاحاً فیبر نوری شرایط تک مد بودن را داراست.

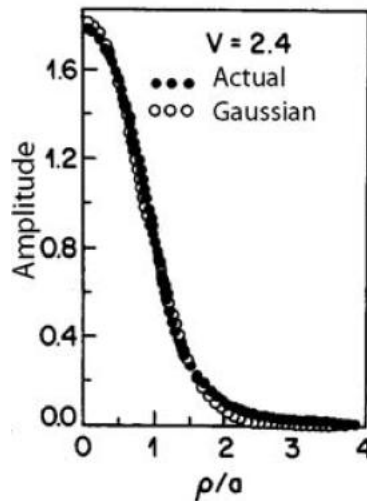
شکل کلی یک میدان نوری در فیبر به صورت رابطه‌ی (۲-۸) می‌باشد:

$$E_z = J_m(k_x^r \rho) e^{im\varphi} e^{i\beta z} \quad (۲ - ۸)$$

که ثوابت انتشار  $\beta$  و  $k_x$  در رابطه (۲-۹) صدق می‌کند [۱۷].

$$k_x^r = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (۲ - ۹)$$

آشکار است توزیع میدان در فیبرهای نوری، متفاوت از انتشار پرتو در محیط باز است. اگرچه مدهای پایه در فیبرهای نوری با توزیع گوسی تقریب می‌زنند. اما مدهای بالاتر داخل فیبر با مدهای بالاتر با مدهای گوسی تقریب نمی‌خورند.



شکل ۲-۲: مقایسه شکل مد پایه درون فیبر با پرتو گوسی که در محیط‌های غیر فیبری انتشار می‌یابد [۱۷].