

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه پیام نور

مرکز شیراز

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک اتمی

گروه فیزیک

عنوان:

لیزرهای فیبری غیرمحوری: بررسی اثرات ترموآپتیکی با استفاده

از تابع گرین

استاد راهنمای اول:

دکتر پرویز الهی

استاد راهنمای دوم:

دکتر عبدالرسول قرائتی

نگارش:

فاطمه محمدی زاده

مهرماه 1387



دانشگاه پیام نور

بسمه تعالی

تصویب پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان نامه تحت عنوان :

لیزرهای فیبری غیر محوری: بررسی اثرات ترمو اپتیکی با استفاده از روش تابع گرین

که توسط فاطمه محمدی زاده در مرکز شیراز تهیه و به هیأت داوران ارائه گردیده است مورد تأیید می باشد.

تاریخ دفاع: 87/7/15 نمره: 19 (نوزده تمام) درجه ارزشیابی : عالی

اعضای هیأت داوران:

<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>هیأت داوران</u>	<u>مرتبه علمی</u>	<u>امضاء</u>
1- دکتر پرویز الهی	استاد راهنما	استادیار دانشگاه پیام نور شیراز	
2- دکتر عبدالرسول قرائتی	استاد راهنما	استادیار دانشگاه پیام نور شیراز	
3- دکتر حمید نادگران	استاد داور	دانشیار دانشگاه شیراز	
4- دکتر حسین توللی	نماینده تحصیلات تکمیلی	استادیار دانشگاه پیام نور شیراز	

تقدیم به

همسر و پسر عزیزم

که با تشویق و هم‌دلی همواره با من بوده‌اند.

سپاس‌گزاری

از جناب آقای دکتر الهی برای راهنمایی و حمایت دل‌گرم‌کننده‌ی ایشان و جناب آقای دکتر قرائتی که با همراهی و راهنمایی مفیدشان در این کار راه‌گشای من بودند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده

بررسی تابع توزیع حرارت در تار لیزر غیر محوری به روش تابع گرین

به وسیله‌ی

فاطمه محمدی زاده

امروزه لیزرهای فیبری به دلیل خواص منحصر به فرد از جمله بازده بالا، حجم و وزن کم، قیمت نسبتاً ارزان، کاربردهای فراوان آنها در ارتباطات نوری، تحقیقات، پزشکی، حس‌گرها، کنترل از راه دور، ساخت مواد و صنایع دفاعی بسیار مورد توجه هستند.

لیزرهای با توان بالا روز به روز کاربرد بیشتری در همه‌ی زمینه‌ها پیدا می‌کنند. افزایش توان خروجی، افزایش گرما درون مجموعه لیزری را در پی دارد. از آنجا که گرما تأثیر زیادی بر مشخصات دستگاه اپتیکی و کیفیت خروجی آن دارد، در طراحی و ساخت این ابزار نمی‌توان این آثار را از نظر دور داشت. از این رو بررسی دلایل ایجاد گرما، اثرات حاصل از آن و چگونگی رفع آنها زمینه‌هایی هستند که پرداختن به آنها ضروری به نظر می‌رسد.

در این کار، تابع توزیع دما در یک لیزر فیبری با هسته‌ی استوانه‌ای غیر محوری¹ به دست آمده است. به دلیل نامتقارن قرار گرفتن هسته و تابع زاویه بودن دما، معادله‌ی انتقال حرارت به روش تابع گرین حل شده است.

با داشتن تابع توزیع دما، می‌توان اثرات ترموآپتیکی از جمله تغییرات وابسته به دمای ضریب شکست درون فیبر، هم‌چنین تنش حرارتی وابسته به دما را در آن بررسی کرد. نمودارهای مربوط به تابع توزیع دما، تغییرات ضریب شکست و تنش‌های حرارتی برای لیزر فیبری *Yb:glass* به طور خاص رسم شده‌اند.

با متوسط‌گیری روی زاویه برای تابع دما، تابعی برای توزیع دما به می‌آید که فقط تابع شعاع است. در حالت خاصی که فاصله مرکز فیبر تا مرکز دمش با شعاع دمش برابر است، نمودار این دمای متوسط با نمودار تابع توزیع دما در دمش محوری و همچنین نمودارهای تنش وابسته به دما به طور رضایت‌بخشی قابل مقایسه است.

فهرست مطالب

د	چکیده	.....
و	فهرست مطالب	.....
ح	فهرست نمودارها	.....
1	فصل اول: مقدمه	.....
7	فصل دوم: لیزرها، فیبرهای نوری	.....
7	1-2. فرآیند ایجاد لیزر	.....
8	2-2 انواع لیزرها	.....
9	1-2-2 لیزرهای حالت جامد	.....
9	2-2-2 لیزرهای نیمه رسانا	.....
10	3-2-2 لیزرهای گازی	.....
12	4-2-2 لیزرهای مایع رنگی	.....
13	3-2 فیبر نوری	.....
14	1-3-2 فیبر با ضریب شکست پله‌ای	.....
16	2-3-2 فیبر با ضریب شکست تدریجی	.....
18	3-3-2 مواد فیبر نوری	.....
19	4-2 تضعیف و پاشندگی در فیبرها	.....
22	فصل سوم: لیزرهای فیبری، اثرات حرارتی	.....
22	1-3 لیزر فیبری	.....
27	2-3 کاربرد لیزر فیبری	.....
28	3-3 اثرات ترمووپتیکی	.....
29	1-3-3 ایجاد گرما	.....
30	2-3-3 اثرات گرما	.....
35	فصل چهارم: توابع گرین و کاربرد در حل معادلات دیفرانسیل	.....
35	1-4 حل معادلات دیفرانسیل ناهمگن به روش تابع گرین	.....

35	1-1-4 معادلات دیفرانسیل معمولی
37	2-1-4 معادلات دیفرانسیل جزئی
38	2-4 معادلات دیفرانسیل شبیه به معادله‌ی هلمهولتز
41	3-4 روش‌های استخراج تابع گرین
42	4-4 استخراج تابع گرین معادله‌ی انتقال حرارت در لیزر فیبری با دمش غیرمحوری
	فصل پنجم: استخراج تابع توزیع دما درون لیزر فیبری با دمش انتهایی غیرمحوری و بررسی
49	اثرات ترموآپتیکی
50	1-5 تابع توزیع دما
59	2-5 عدسی گرمایی
60	3-5 تنش‌های حرارتی
63	بحث و نتیجه گیری
65	فهرست منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل (1-1): افزایش توان خروجی لیزرهای فیبری ساخته شده از سال 1996 تا 2006 4
- شکل (1-2): ساختمان فیبر نوری 13
- شکل (2-2): تغییرات ضریب شکست با شعاع در فیبر با ضریب شکست پله‌ای 14
- شکل (3-2): مسیر حرکت نور در هسته یک فیبر 15
- شکل (4-2): نمای فیبر با ضریب شکست تدریجی 17
- شکل (1-3): گستره طول موج‌های خروجی در لیزرهای فیبری 23
- شکل (2-3): نمای دمش هسته‌ای در لیزر فیبری 25
- شکل (3-3): نمای دمش غلافی در لیزر فیبری 26
- شکل (4-3): طرح‌های مختلف قرارگیری هسته در غلاف 26
- شکل (5-3): نقص کوانتوم گرمایی 29
- شکل (6-3): ایجاد گرما 30
- شکل (3-7): ایجاد گرما 30
- شکل (1-4): سطح مقطع فیبر با دمش یکنواخت غیرمحوری 43
- شکل (2-4): استوانه فرضی در فاصله r از یک چشمه خطی 44
- شکل (3-4): چشمه و تصویر آن در دستگاه مختصات به مرکز فیبر 45
- شکل (1-5): نمودار سه بعدی تابع گرین 51
- شکل (2-5): نمودار سه بعدی چشمه‌ی بدون مرز (T_1) 53
- شکل (3-5): نمودار سه بعدی مرز بدون چشمه (T_2) 54
- شکل (4-5): تابع توزیع دما 55
- شکل (5-5): کانتور تابع توزیع دما 56
- شکل (6-5): تابع توزیع دما برحسب شعاع در سه زاویه‌ی مشخص 57
- شکل (7-5): تغییرات دما روی مرز فیبر 57
- شکل (8-5): دمای متوسط در دمش غیرمحوری برحسب شعاع 58
- شکل (9-5): تغییرات دما بر حسب شعاع در دمش محوری 59
- شکل (10-5): تغییرات ضریب شکست وابسته به دما 60

شکل (5-11): تنش‌های حرارتی در دمش غیرمحوری 62

شکل (5-12): تنش‌های حرارتی در دمش محوری 62

فصل 1

مقدمه



در شانزدهم می سال 1960 دکتر تئودور مایمن¹ اولین لیزر را با موفقیت به کار انداخت. میله‌ای از یاقوت مصنوعی با کم‌تر از $2/5$ سانتی‌متر طول و حدود $0/8$ سانتی‌متر قطر، که درون یک لامپ درخش مارپیچ شیشه‌ای قرار داشت. دو انتهای تخت میله‌ی یاقوت به دقت صیقل داده و با نقره پوشش داده شده بود. ناگهان نور در لامپ برقرار شد و پرتوی کوتاه از نور قرمز لیزر، روشن‌تر از نور خورشید، از انتهای میله‌ی یاقوت بیرون جست. به این ترتیب اولین گام برای ورود به دنیای جدید لیزر برداشته شد.

1. Theodore Maiman

نور لیزر را می‌توان چنان قوی تولید کرد که هر ماده شناخته شده را در کسری از ثانیه بخار کند و سخت‌ترین اجسام را سوراخ کند یا می‌توان باریکه‌های کم قدرت و فوق‌العاده دقیق انواع دیگر لیزر را در کارهای بسیار ظریف مثل جراحی چشم انسان به کار برد. موفقیت دکتر مایمن، سرآغاز پیدایش عصر جدیدی در تکنولوژی لیزر بود لیزر یاقوت در رشد لیزرهای جدید در صف مقدم قرار داشت.[1]

خبر ساخت اولین فیبر نوری نیز در سال 1966 هم‌زمان در انگلیس و فرانسه اعلام شد که در عمل برای مخابرات قابل استفاده نبود. اما پس از اختراع لیزر ایده‌ی به کارگیری لیزر فیبری برای انتقال اطلاعات شکل گرفت. در سال 1976 پژوهش‌گران توانستند با کاهش اتلاف در فیبرها آن‌ها را با کابل‌های مسی قابل مقایسه کنند.

لیزرهای فیبری آلاییده با عناصر نادر خاکی، ابتدا در سال‌های 1960 و پس از ارائه‌ی لیزرهای دیودی توان بالا و به صورت جدی‌تری در سال‌های 1985 مطرح گردیدند در همین ضمن فیبرهای نوری با مغزی خیلی کوچک تکامل یافتند که می‌توانستند سالیتون‌ها را انتقال دهند. در 1988 پالس‌های نوری به فاصله 4000 کیلومتر منتقل شدند.

در سال 1989 دانشمندان دریافتند که اگر فیبرهای نوری با عنصر ایریوم آلاییده شوند، می‌توانند به صورت تقویت کننده برای خودشان عمل کنند. در آوریل 1991 با این تغییر در فیبر نوری و استفاده از لیزرهای سالیتون، مولنائر¹ توانست 2/5 گیگا بایت اطلاعات را بیش از 7500 کیلومتر انتقال دهد.[1]

این لیزرهای فیبری علاوه بر ارتباطات نوری، در تحقیقات، پزشکی، حس‌گرها و کنترل از راه دور، ساخت مواد و صنایع دفاعی نیز به کار گرفته شدند.

محصور شدن نور درون فیبر و خواص لیزری مناسب یون‌های خاکی به عنوان ماده فعال لیزری، بازده این دسته از فیبرها را افزایش داده است. توان آستانه‌ی آن‌ها می‌تواند در حد صد میکرووات باشد و خروجی این لیزرها تا چندین کیلووات گزارش شده است. گذارهای لیزری متفاوت موجود در یون‌های خاکی نادر به آن‌ها توانایی ایجاد خروجی در یک بازه از مادون قرمز تا ماورای بنفش را می‌دهد. این لیزرها جای‌گزینی جدی برای لیزرهای حالت جامد معمولی هستند.

از جمله دلایل جای‌گزینی آن‌ها می‌توان به بازده بالاتر، حجم و وزن کم‌تر و قیمت ارزان‌تر این دستگاه‌ها اشاره نمود. این نوع لیزر با لیزرهای نیمه رسانا نیز رقابت می‌کنند. در این لیزرها ماده

فعال به صورت ناخالصی درون هسته یا غلاف آلاینده می‌شود. از جمله این عناصر می‌توان نئودمیوم، ایربیوم و ایتربیوم را نام برد. [2]

از لیزرهای فیبری با توان کم در پزشکی و جراحی‌های با دقت بالا استفاده‌های فراوان می‌شود زیرا کنترل خروجی و ایجاد پرتوهای پیوسته در این نوع لیزر آسان‌تر است.

ایجاد خروجی پرتوان، از خصوصیات منحصر به فرد لیزر فیبری است به طوری که بالا بردن توان خروجی لیزرها از اهداف همه‌ی پژوهش‌گران در این زمینه بوده است، که نه تنها به دلیل کنجکاوای بلکه به دلیل نیاز به توان‌های بالا در کاربردهای لیزر می‌باشد. برای مدت طولانی ایجاد توان‌های بالا فقط به گستره‌ی لیزرهای گازی و بعضی لیزرهای حالت جامد، محدود بود. اما لیزرهای فیبری به تازگی پا به این عرصه گذاشته‌اند. [3]

در ادامه تاریخچه ساخت و تکامل لیزرهای فیبری به طور خلاصه آمده است:

1964 بررسی اولین فیبر آلاینده با عنصر Nd به صورت یک فیبر با دمش لامپ درخش حلقوی

1974 فیبر سیلیکا آلاینده با Nd با دمش دیود لیزر $GaAs$

1985 ساخت لیزرهای فیبری سیلیکا با آلاینده‌ی عناصر خاکی کم اتلاف با دمش دیودی

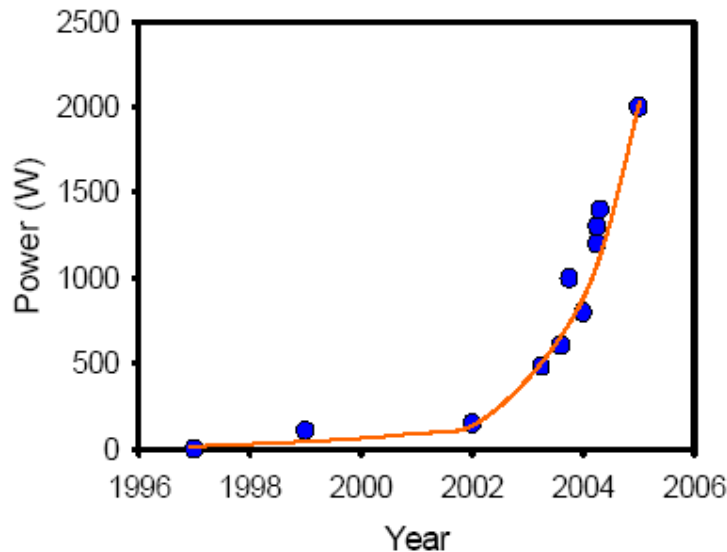
1987 اولین تقویت کننده‌ی فیبری با آلاینده‌ی ایربیوم

1988 اولین لیزر فیبری با دمش غلافی با آلاینده‌ی Nd و هسته‌ی غیر محوری¹

1999 اولین لیزر فیبری با دمش غلافی و توان بیش از صد وات

2002 اولین لیزر فیبری با توان خروجی بیش از یک کیلو وات

2005 لیزر فیبری سیلیکا با ناخالصی ایتربیوم با توان خروجی بیش از 2 کیلو وات [4 - 12]



شکل (1-1): نمودار افزایش توان خروجی لیزر فیبری سیلیکا با ناخالصی Yb با دمش غلافی از سال 1996 تا 2006، [3]

در شکل (1-1) روند افزایش توان خروجی لیزرهای فیبری تولید شده طی سال‌های 1996 تا 2006 به صورت نمودار آمده است. با توجه به تقاضا برای توان‌های بالا در خروجی لیزرها، نمی‌توان آثاری را که گرمای تولید شده در لیزرها به جا می‌گذارند نادیده گرفت. چرا که به دلایل مختلف قسمتی از توان ورودی به دستگاه به گرما تبدیل شده و می‌تواند خواص اپتیکی آن را تغییر دهد.

انرژی گرمایی ایجاد شده در محیط فعال، به طور مستقیم بر عمل کرد دستگاه و خواص باریکه تاثیر می‌گذارد این مسأله سبب می‌شود نتایج بررسی این آثار در طراحی و ساخت دستگاه‌ها مورد توجه قرار گیرد.

تغییرات گرمایی ایجاد شده در ماده باعث کاهش کیفیت پرتوی خروجی، ناپایداری مجموعه، گاهی حتی ایجاد شکستگی ماده فعال و یا سوختن پوشش در فیبرها می‌شود. بنابراین شناخت عواملی که باعث ایجاد گرما می‌شوند، و تلاش برای رفع آن‌ها برای افزایش کیفیت لیزر، مؤثر است. [13 – 23]

از جمله دلایل ایجاد گرما می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نقص کوانتوم گرمایی، جذب تابش لیزر، گذارهای غیر تابشی از حالت‌های بالاتر، جذب مستقیم نور در داخل و خارج ناحیه دمش و ...

گرم شدن ماده سبب ایجاد تنش‌های حرارتی می‌گردد به این معنی که گرادیان گرمایی ایجاد شده تنش‌های مکانیکی ایجاد می‌کند، که اگر از قدرت کشسانی ماده بیش‌تر باشد، موجب شکستن ماده می‌گردد. تغییر شکل در اثر تنش، می‌تواند منجر به ایجاد پدیده دوشکستی و اتلاف ناشی از واقتبیدگی شود. [42]

هم‌چنین در اثر گرم شدن محیط، ضریب شکست ماده تغییر می‌کند که این امر پدیده‌ی عدسی گرمایی را موجب می‌شود.

خمیدگی سطوح ابتدا و انتهای کریستال یا ماده فعال، در اثر تابع توزیع دمایی ناهمگن، اثرات انتهایی را به وجود می‌آورد. [24 و 42]

برای بررسی اثرات گرمایی درون دستگاه، لازم است که با توجه به هندسه‌ی حاکم بر مجموعه لیزر و شرایط مرزی موجود، معادله‌ی انتقال حرارت برای مجموعه حل شود. پاسخ این معادله تابع توزیع حرارت است که دما را در هر نقطه از ماده فعال مشخص می‌کند.

با دانستن تابع توزیع دما، تغییرات ضریب شکست، تنش‌های حرارتی، و سایر اثرات ترموپتیکی قابل بررسی خواهد بود.

اخیراً اثرات حرارتی در کریستال‌های بلند و کوتاه و لیزرهای فیبری بررسی شده و در راستای این پژوهش‌ها فعالیت‌هایی نیز در زمینه‌ی رفع این آثار برای طراحی و ساخت مشددهای لیزری انجام شده است. [25]

در این پایان‌نامه، تابع توزیع دما درون یک لیزر فیبری استوانه‌ای غیر محوری که تحت تأثیر دمش تاب‌هت قرار دارد، به دست آمده است.

با استفاده از این تابع، تغییرات ضریب شکست درون فیبر و هم‌چنین تنش‌های حرارتی ایجاد شده در اثر گرما مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

غیرمحوری بودن دمش، عدم تقارنی را در هندسه‌ی مجموعه ایجاد می‌کند که حل معادله‌ی انتقال حرارت را با وجود شرایط مرزی موجود با مشکل مواجه می‌سازد.

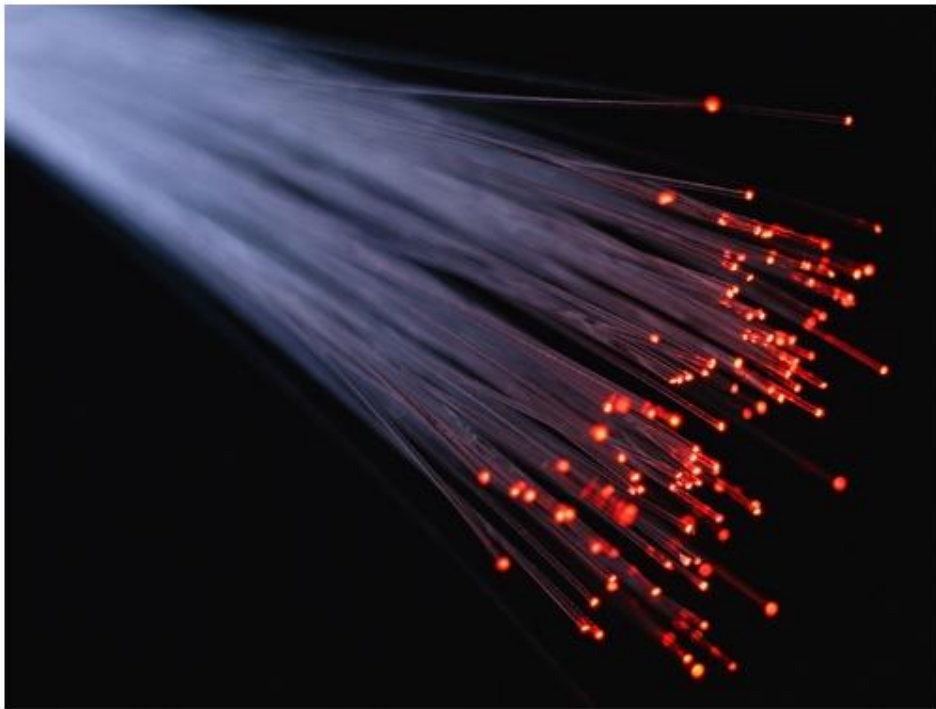
یکی از روش‌هایی که در حل معادلات دیفرانسیل ناهمگن به کار می‌رود، استفاده از تابع گرین است. در این روش، ابتدا باید تابع گرین را برای معادله تحت شرایط مرزی همگن، به دست آورد سپس می‌توان جواب معادله را با شرایط مرزی ناهمگن به صورت انتگرالی نوشت.

در این کار ابتدا تابع گرین معادله انتقال حرارت به دست آمده و بعد تابع توزیع دما با استفاده از روابط انتگرالی استخراج شده است.

پایان نامه حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. مقدمه‌ای کلی در فصل اول آمده و فصل دوم، مروری بر لیزرها و فیبرهای نوری است، در فصل سوم لیزرهای فیبری و اثرات گرمایی ایجاد شده درون ماده فعال بررسی شده است. فصل چهارم شامل مقدمه‌ای در مورد روش تابع گرین برای حل معادلات دیفرانسیل ناهمگن است که تابع گرین برای معادله‌ی انتقال حرارت تحت شرایط خاص در ادامه‌ی همین فصل به دست آمده. در فصل پنجم تابع توزیع دما، تغییرات ضریب شکست وابسته به دما و تنش‌های حرارتی بررسی شده‌اند.

فصل 2

لیزرها، فیبرهای نوری



2-1- فرآیند ایجاد لیزر

اولین قسمت اساسی هر لیزر عبارت است از یک چشمه‌ی دمش که این چشمه می‌تواند الکتریکی یا یک چشمه‌ی نور معمولی پر قدرت و یا یک لیزر دیگر باشد.

قسمت لازم دیگر محیط فعال است. این محیط انرژی را جذب و آزاد می‌کند که می‌تواند جامد مثل یاقوت یا بلورهای دیگر، مایع و یا گاز باشد در واقع باریکه‌ی لیزر در این محیط ایجاد می‌شود.

بخش دیگر از مجموعه ایجاد لیزر، کاواک یا مشدد است که از دو آینه یا سطح باز تابنده تشکیل شده است و در دو انتهای ماده‌ی فعال قرار می‌گیرد. یکی از این دو آینه می‌تواند درصدی از نور را از خود عبور دهد.

ابتدا انرژی ایجاد شده توسط چشمه انرژی در ماده فعال جذب می‌شود که باعث برانگیخته شدن بعضی از اتم‌های ماده‌ی فعال می‌شود این دمش انرژی ادامه می‌یابد تا جایی که در محیط فعال تعداد اتم‌های برانگیخته از اتم‌های با انرژی پایین بیشتر شود. یعنی وارونی جمعیت که اساس ایجاد نور لیزر است به وجود آید.

اتم‌های برانگیخته با برگشتن به تراز پایین‌تر انرژی خود را به صورت فوتون آزاد می‌کنند. فوتون حاصل می‌تواند باعث تحریک اتم دیگری شود به این ترتیب اتم‌های بیش‌تر و بیش‌تری از محیط فعال فوتون تابش می‌کنند. وقتی فوتونی سبب آزاد شدن یک فوتون دیگر از یک اتم برانگیخته شود، گسیل القایی رخ داده است.

آینه‌های دو سر لیزر نور گسیل شده را به محیط فعال بر می‌گردانند تا فرآیند تقویت توسط مشدد باعث هرچه قوی‌تر شدن نور گردد و بالاخره پرتو نور همدوس تک بسامد لیزر با شدت بالا از آینه‌ی نیم اندود خارج می‌شود. [1 و 26]

2-2- انواع لیزرها

لیزرها بر اساس نوع ماده‌ی فعال تقسیم‌بندی و نام‌گذاری می‌شوند. با توجه به طبیعت ماده‌ی فعال لیزرها، چهار دسته زیر به طور خلاصه شرح داده می‌شود:

- لیزرهای کریستالی (حالت جامد)
- لیزرهای نیمه رسانا
- لیزرهای گازی
- لیزرهای مایع رنگ

2-2-1- لیزرهای حالت جامد

در این لیزرها، یون‌های ناخالصی که در شبکه‌ی بلوری یک ماده‌ی جامد (میزبان) قرار گرفته‌اند، ماده‌ی فعال را تشکیل می‌دهند. خواص فیزیکی میزبان از جمله هدایت گرمایی و انبساط حرارتی آن در تعیین میزان توان لیزر ایجاد شده مهم هستند. به علاوه، شبکه‌ی میزبان ترازهای یون‌ها را اصلاح می‌کند به طوری که اگر همان یون در میزبان‌های مختلفی قرار گیرد، طول موج‌های لیزری متفاوتی حاصل می‌شود.

باند جذبی پهن یون‌های ناخالصی، که به طول موج‌های تابشی چشمه‌های نور معمولی نزدیک است، این امکان را فراهم می‌کند که از چشمه‌های نور برای تحریک این نوع لیزر استفاده شود و میزان قابل توجهی از نور تابشی جذب گردد. چشمه‌ی دمش می‌تواند پیوسته و یا پالسی باشد و وقتی چشمه دمش پالسی باشد، زمان بین دو پالس متوالی، فرصتی برای خنک شدن کریستال فراهم می‌کند.

به عنوان مثال از لیزر $Nd:YAG$ می‌توان نام برد در این کریستال، Nd^{+3} در شبکه به جای یون‌های ایتیریم قرار می‌گیرند و حداکثر میزان آلاینده، حدود 1/5 درصد است. عمل دمش این کریستال با یک لامپ درخش ساده و یک کاواک بازتاب کننده امکان‌پذیر است و از جریان هوا می‌توان برای خنک کردن آن استفاده کرد.

در لیزر $Nd:glass$ از شیشه به عنوان میزبان استفاده می‌شود که به دلیل کم بودن هزینه و راحتی ساخت و امکان آرایش بیش‌تر (تا 6 درصد) نسبت به YAG برتری دارد اما به دلیل داشتن ضریب انتقال حرارتی پایین توانایی ایجاد خروجی پیوسته را ندارد.

امکان ساخت میله‌های بلند (تا 1 متر) با قطر چندین ده متر وجود دارد و از این ماده‌ی فعال برای دستگاه‌های پالسی با توان بالا می‌توان استفاده کرد.

از دیگر لیزرهای حالت جامد می‌توان به لیزر یاقوت ($Cr^{+3}Al_2O_3$) و لیزر الکساندریت ($Cr^{+3}:BeAl_2O_4$) اشاره کرد [26].

2-2-2- لیزرهای نیمه رسانا

لیزرهای نیمه رسانا نیز از جامد ساخته شده‌اند اما از نظر ساختار ترازهای انرژی و چگونگی دمش با لیزرهای حالت جامد متفاوتند.