بسم الله الرحمن الرحیم

همه امتیازات این پایان نامه به دانشگاه لرستان تعلق دارد. درصورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب در مجلات، کنفرانس ها یا سخنرانی ها باید نام دانشگاه لرستان (یا اساتید راهنمای پایان نامه) و نام دانشجو با ذکر ماخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.

تقدیم

با بوسه بر دستان پدرم:

به او که به خود رنج داد تا آسایش را به

من هدیه کند و بازندگی سراسرتلاش،

زمینه پیشرفت من را فراهم کرد.

به مادر عزیزتر از جانم:

که خداوند، هستی ام را ازطریق او

به من ارزانی داشت. می ستایمت مادر که سزاوارستایشی.

به خانواده عزیزم:

خواهران وبرادرانم

و تمام کسانی که دوستشان دارم.

سپاسگزاری

باامتنان به درگاه ایزدیکتا،ازتمامی

اساتیدودوستانی که مرا در انجام این

پایان نامه یاری کرده اند تشکرمیکنم.

همچنین لازم میدانم تااز زحمات

فراوان خانواده ام واستادان گرانقدرم

جناب آقای دکتربهاروند ودکتر جمشیدی

کمال تشکر وقدردانی را داشته باشم.

وزارت علوم، تحقیقات وفناوری

دانشگاه لرستان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

مطالعه اثرات برهمکنش لیزر پرتوان با مواد مختلف برای طیف سنجی و آنالیز ماده

ندا عا بدی نمرور

استاد راهنمای اول:

دکترعبدالرحیم بهاروند

استاد راهنمای دوم:

دکتر کاظم جمشیدی قلعه

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک

گرایش اتمی ومولکولی

بهمن ۱۳۹۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده..... یک

مقدمه..... ۱

فصل اول: ویژگی های پالس های لیزری پرتوان

۱-۱ مقدمه ۴

۱-۲ مکانیزم های اصلی تولید پرتوهای لیزری..... ۶

۱-۲-۱ گسیل تحریکی، سازوکار ایجادبهره..... ۷

۱-۲-۲ ایجاد پس برخورد،کاواک لیزری..... ۹

۱-۲-۳ نوسان چندمدی..... ۱۰

۱-۳ روش های تولید پالس های لیزری کوتاه و فراکوتاه..... ۱۲

۱-۳-۱ کلیدزنی Q ۱۲

۱-۳-۲ قفل زنی مد ۱۷

۱-۳-۳ رژیم کارکردی قفل شده مدی..... ۲۲

۱-۴مهمترین سیستم های تولیدکننده پالس های فمتوثانیه..... ۲۸

۱-۴-۱ لیزر Ti:Sapphire..... ۲۸

۱-۴-۲ سایر لیزرهای فمتوثانیه ایی ۳۲

فصل دوم: مکانیسم های برهم کنش لیزر پرتوان در محیط های شفاف

۲-۱ مقدمه..... ۳۵

۲-۲ انتشارخطی ۳۵

۲-۳انتشار غیرخطی..... ۳۷

۲-۳-۱ شکست غیرخطی ۳۹

۲-۳-۲ جذب غیرخطی ۴۰

۲-۳-۳ خودهمگرایی..... ۴۴

۲-۳-۴ خودمدولاسیون فازی ۵۲

۲-۳-۵ تولید نور سفید..... ۵۶

۲-۴ یونش غیرخطی..... ۵۸

۲-۴-۱یونش نوری غیرخطی..... ۵۸

۲-۴-۲ یونش بهمنی ۶۳

۲-۴-۳ جذب حامل آزاد توسط پلاسما..... ۶۵

۲-۴-۴ خودواگرایی پلاسما وتأثیرآن..... ۶۶

۲-۵ اثرتیرگی..... ۶۹

فصل سوم: سنجش (طیف سنجی) از راه دور باتکنیک LIBS

۳-۱ مقدمه ۷۱

۳-۲ LIBS مسیزبازمتداول..... ۷۶

۳-۲-۱ ابزارها ۷۶

۳-۲-۲متمرکز کردن پالس لیزر ۷۷

۳-۲-۳ جمع آوری نورپلاسما ۸۲

۳-۳ LIBS به روشStand-off با استفاده از پالس های فمتوثانیه ۸۵

۳-۳-۱ LIBS به روش از راه دور مرسوم با پالس فمتوثانیه..... ۸۵

۳-۳-۲ تحلیل از راه دور فیلامنتیشن تولید شده باپالس فمتوثانیه..... ۸۷

۳-۳-۳ تراموبیل ۸۹

۳-۴ LIBS فیبر نوری ۹۰

۳-۴-۱ فیبرنوری برای جمع آوری نور ۹۰

۳-۴-۲ فیبرها برای انتقال پالس لیزر..... ۹۳

۳-۵ نمونه هایی از تحقیقات اخیر LIBS،ابزارها،کاربردها..... ۹۷

۳-۵-۱ آنالیزهای سطحی ۹۷

۳-۵-۲ کاربردهای راکتور هسته ۹۸

۳-۵-۳ LIBS برای کاربردهای فضایی ۱۰۱

فصل چهارم: اثرات دائمی وبرگشت پذیر برهم کنش لیزرپرتوان با ماده وکاربردهای آن

۴-۱ مقدمه ۱۰۸

۴-۲ اثرحرارتی ومکانیسم های بوجودآورنده آن..... ۱۱۱

۴-۲-۱ انفجار فاز(حالت ماده) ۱۱۲

۴-۳ اثرمکانیکی ومکانیسم های بوجودآورنده آن..... ۱۱۲

۴-۴ اثرات نوری ومکانیسم های بوجودآورنده آن..... ۱۱۳

۴-۴-۱ تولید طیف ابرپیوسته ۱۱۳

۴-۴-۲ ایجاد مراکز رنگ (اثرتیرگی)..... ۱۱۵

۴-۵ نتایج تجربی..... ۱۱۷

۴-۶ استفاده های کاربردی..... ۱۲۸

فهرست منابع ۱۳۲

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

(۱-۱) فاصله فرکانسی مدهای کاواک..... ۱۲

(۱-۲) یک کاواک لیزری با آینه دوار، برای کلید زنیQ..... ۱۴

(۱-۳) استفاده از کلید الکترواپتیکی برای کلیدزنی Q..... ۱۵

(۱-۴)تأثیر رابطه فازی بین مدها در شدت برایند نوسان..... ۱۹

(۱-۵) نمایش فرنل برای تداخلm مد..... .. ۲۱

(۱-۶) خروجی یک لیزر نوعی در رژیم قفل شده مدی..... . ۲۲

(۱-۷) توزیع زمانی مجذور دامنه میدان الکتریکی..... ۲۵

(۱-۸) چند مده مدوله شدن دامنه تابش لیزری برای انجام قفل زنی مد..... ۲۶

(۱-۹) ساختار شمایی یک لیزر Ti:Sapphire..... ۲۹

(۱-۱۰)طیف های جذبی و گسیلی بلور (Ti:Al2O3)..... ۳۰

(۱-۱۱) موقعیت Ti در شبکه سفایر..... ۳۱

(۲-۱) نمایش ترازهای انرژی وفرایند جذب خطی وn- فوتونی..... ۴۳

(۲-۲) نمایش شمایی خودهمگرایی..... ۴۵

(۲-۳) نمایش شمایی خودمدولاسیون فازی..... ۵۳

(۲-۴) جابجایی فاز..... ۵۵

(۲-۵) شدت طیفی یک پالس گاوسی پس از انتشار از محیط غیرخطی..... ۵۶

(۲-۶)خودسراشیبی یک پالس کوتاه لیزری..... ۵۷

(۲-۷)نمایش شمایی فرایندهای دخیل در یونش نوری..... ۵۹

(۲-۸)آهنگ یونش نوری وپارامتر Keldysh ۶۲

(۲-۹)نمایش شمایی یونش بهمنی..... ۶۴

(۳-۱)شماتیک سیستم LIBS از راه دوربرای روش مسیرباز متداول..... ۷۶

(۳-۲)نمایش LIBS به روش stand-off..... ۷۶

(۳-۳)رابطه مابین f و d برای $d_{diff} = d_{aber}$..... ۷۹

(۳-۴)محدوده رایلی پرتو گوسی متمرکز شده برای حداقل اندازه نقطه d_0 ..... ۸۰

(۳-۵)دامنه عملیاتی مفید سیستمLIBS به ازای دامنه مسافت های آنالیز Stand-off..... ۸۲

(۳-۶)یکی از روش های جمع آوری نور پلاسما با استفاده از یک تک لنز..... .۸۴

(۳-۷)یک پالس چیریپد شده منفی..... ۸۶
(۳-۸) فیلمان های تولید شده طولانی تر از طول مسیر..... ۸۹
(۳-۹) تمرکز نور پلاسما بر روی شکاف طیف سنج..... ۹۲
(۳-۱۰) تنوع سیگنال ثبت شده..... ۹۳
(۳-۱۱) روش تزریق پالس لیزر به یک فیبر برای تشکیل پلاسمای لیزر از راه دور..... ۹۴
(۳-۱۲) عکس و نمودار نشان دهنده یک روش برای انتقال پالس لیزر وجمع آوری نور پلاسما..... ۹۴
(۳-۱۳) ابزار آزمایشگاهی برای اسکن سطح با استفاده از تکنیکLIBS ۹۸
(۳-۱۴) نمایش مقطعی مخزن راکتور خنک کننده گاز ۱۰۰
(۳-۱۵) دیسک آلومینیومی با قطرmm ۷۵ ، غوطه ور در آب با ابزار ۱۰۱
(۳-۱۶) مرکز کندگی در بازا لت در فاصله m ۳ ..... ۱۰۴
(۳-۱۷) تصویر بسیار نزدیک مدور..... ۱۰۴
(۳-۱۸) تصویرگرفته شده توسط وسیله سیار در مکان فرود ۱۰۵
(۴-۱)طرحی از شکل نوعی طیف ابرپیوسته تولید شده در داخل یک ماده شـفاف..... ۱۱۴
(۴-۲) چیدمان آزمایشگاهی برای تحت تابش قرار دادن نمونه های شیشه ایی با پالس لیزری پرتوان.....۱۱۶
(۴-۳) کندگی بعداز ذوب شدن نمونه پلیمری پلی اتیلن ترفتلات..... ۱۱۸
(۴-۴) تشکیل حبابها در داخل و اثرات انفجار فاز با نمونه پلیمری تفزل..... ۱۱۹
(۴-۵)تشکیل نانوساختارهایی از سیلیکون در محل تابش ۱۱۹
(۴-۶) ترکهای ایجاد شده در نمونه پلیمری پلی‌اتیلن ترفتلات ۱۲۰
(۴-۷) تصاویری از تولید طیف ابرپیوسته در نمونه های مختلف شیشه..... ۱۲۱
(۴-۸) طیف های مرئی پالس های لیزری خروجی از نمونه اسکیتری (SK) ۱۲۲
(۴-۹) طیف های مرئی پالس های لیزری خروجی از نمونه شیشه فتوکرمیک(PH)..... ۱۲۴
(۴-۱۰) طیف های مرئی پالس های لیزری خروجی از نمونه شیشه کوارتز(QUA) ..... .۱۲۵
(۴-۱۱) طیف های مرئی پالس های لیزری خروجی از نمونـه شیشــه (FGQU) ۱۲۶
(۴-۱۲) تصاویر اثر تیرگی در نمونه های مختلف شیشه.....۱۲۷

فهرست جداول

عنوان صفحه

(۳-۱)روش های اندازه گیری فواصل هدف در LIBS..... ۸۲
(۳-۲) عوامل موثر تخریب فیبر برای انتقال پالس لیزر..... ۹

چکیده:

لیزرهایی با طول پالس زمانی کوتاه دارای توان بالایی بود که از این رو به آنها لیزرهای پرتوان اطلاق می شود. وقتی که پالس پرتوان لیزری با یک ماده بر هم کنش می کند، هم خودپالس وهم ماده دچار تغییرات می شوند. اثراتی چون خودکنشی، خودمدولاسیون فازی ازجمله اثراتی هستندکه درپالس لیزری ایجاد می شوند.از طرف دیگر ،کندگی لیزری واثر تیرگی ازجمله اثراتی که در ماده هدف ایجاد می شود. مجموعه این تغییرات وفرآیندهای جالب باعث می شود که تا اطلاعاتی ازماده وپارامترهای لیزر حاصل شود که این کار باعث شده تحقیقات زیادی در این زمینه صورت بگیرد. باکنترل پارامترهای لیزرتابشی می توان نتایج کنترل شده ایی را در برهم کنش با یک ماده خاص بدست آورد.

کلمات کلیدی: لیزرهای پرتوان، طیف سنجی ،مکانیسم های برهم کنش، محیط های شفاف، تولید طیف ابرپیوسته، اثرتیرگی.

مقدمه

باتوجه به سرعت رو به رشد تکنولوژی در عصر حاضر لیزرهای پرتوان می توانند جایگاه خوبی در این زمینه به عهده داشته باشند. امروزه در مناطق مختلف جهان، بررسی ها وپژوهش های بسیاری در زمینه بر هم کنش های لیزری با مواد مختلف صورت می گیرد که بسیاری از کاربردهای آنها برای طیف سنجی مواد متفاوت می باشدکه با توجه به ویژگیهای پالس های لیزری پرتوان طیف سنجی های انجام شده می توانند از راه دور نیز صورت گیرند که یکی از مهم ترین روش های سنجش از راه دور تکنیک LIBS می باشد که در فصل سوم این پایان نامه روش ها و کاربردهای آن بررسی خواهد شد.

وقتی نور از یک منبع عادی به سوی ماده منتشر می شود معمولا واکنش خاصی صورت نمی گیرد وماده مورد هدف و نور تابشی بدون تغییر خواهد ماند.اما با انتشار پالس لیزری پرتوان در یک محیط، هم ماده وهم پالس با تغییرات اساسی مواجه می شود. علاوه بر ارزش علمی ذاتی فهم مکانیزم های اندرکنش، بررسی انتشار پالس های پرتوان در مواد شفاف از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا که مواد شفاف در علم وصنعت اپتیک ولیزر کاربردهای زیادی دارند.

در این پایان نامه بعضی از جنبه های اندرکنش پالس های لیزری پرتوان با مواد شفاف موردبحث قرار گرفته است که بسته به شدت لیزری ،تغییرات ایجاد شده در ماده می تواند دائمی یا برگشت پذیر باشد. با بررسی این تغییرات وکنترل آنها می توان در کاربردهای مختلفی از آنها استفاده کرد واین کنترل زمانی میسر است که رابطه بین مشخصات پالس های

لیزری ومشخصات تغییرات ایجاد شده معلوم باشد. از طرفی تغییرات ایجاد شده در پالس های لیزری می تواند هم شکل فضایی وهم شکل زمانی پرتو لیزر را تغییر دهد که تولید طیف ابر پیوسته یکی از این تغییرات شگرف می باشد.

این پایان نامه در چهارفصل تهیه شده است. در فصل اول این پایان نامه ویژگیهای پالس های لیزری فمتوثانیه موردمطالعه قرار گرفته است. روش های متفاوت تولید پالس های فراکوتاه ومهم ترین سیستم های لیزری تولید کننده پالس های لیزری پرتوان معرفی شده است. در فصل دوم مکانیسم های خطی و وغیر خطی اندرکنش پالس های فمتوثانیه مورد بحث قرار گرفته است.در فصل سوم یکی از روش های مهم طیف سنجی با لیزر پرتوان موسوم به روش LIBS وکاربردهایی از این تکنیک را بررسی کرده ایم و در نهایت در فصل چهارم، بحث اصلی تغییرات دائمی وبرگشت پذیر است که مکانیسم حرارتی ومکانیسم مکانیکی و مکانیسم نوری به تفصیل موردبحث قرار گرفته است و چندین طیف حاصل از برهم کنش لیزر پرتوان با مواد مختلف ارائه شده است.

فصل اول:

ویژگی های پالس های لیزری فمتوثانیه

۱-۱ مقدمه

نـام لیـزر[1] برگرفتـه از حـروف اول عبـارت "light amplification by stimulated emission of radiation" است؛ به معنی«تقویت نور به وسـیله گسـیل تحریکـی تـابش». لیزر وسیله‌ای است که یک پرتو نور همدوس پر شدت، متمرکز و کاملاً موازی تولید می‌کند. از لحاظ تاریخی، لیزر، نتیجه رشد و ادامه تحقیقات در زمینه میزر[2] است، وسیله مشابهی که در آن بجای نور مرئی از میکروویوهای رادیویی استفاده می‌شـود. اولـین میزربوسـیله towns در بازه زمانی بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۵۴ساخته شد. در طول ۷ سال بعد از آن تکنولوژی میزرها با جهش‌های بلندی متحول شد.

در سال۱۹۵۸، shawlow و towns اساس میزرهای نوری یا لیزرهـا را ارائـه کردنـد. اولـین لیزری که کارکرد آن بر این اصول بنا نهاده شده بود، در تابستان سال ۱۹۶۰ بوسیله maiman ساخته شد. تحقیقات گسترده به منظور ساخت سیستم‌های لیزری پیشـرفته‌تـر و کارآمـدتر، تـا امروز ادامه دارد و محققان در گوشه کنارجهان در پی آنند تا بر حسب نوع کاربرد، لیزرهایی با مشخصات بهینه شده بسازند. شاید خود اختراع کنندگان لیزر نیز در ابتدا نمی‌توانسـتند تصـور کنند که ابزار ساخته شده توسط آنها چه استفاده‌هایی ممکـن اسـت در آینـده نـه چنـدان دور داشته باشد. از بکارگیری آن در ارتباطات راه دور گرفته تـا ذخیـره و بازیـابی اطلاعـات، و از استفاده‌های مختلف نظامی گرفته تا کاربردهای ظریف پزشکی.

از جمله تحولات قابل توجه در فناوری لیزر، ابداع روش‌هایی بود که برای تولیـد پـالس‌هـای لیزری بکارگرفته شدند. تولیـد پـالس‌هـای لیـزری کوتـاه (در محـدوده نانوثانیـه) و فراکوتـاه

---

[1] - laser
[2] - maser

(درمحدوده پیکوثانیه و زیر پیکوثانیه) با ابداع روش قفل زنی مد[3] که برای اولین بـار در سـال ۱۹۶۴ مطـرح گردیـده[۱]، امکـان پـذیر شـد. در همـین سـال لیـزرNd:YAG و لیزرهـای دای(رزینه‌ایی) ساخته شدند. در اواسط دهه ۱۹۷۰ لیزرفمتوثانه‌ایی با پالس‌های به طول ۳۰۰fs، با استفاده از لیزرهای دای[4] بدست آمدند اکثر محققان، مطالعات خود را بـر روی محـیط‌هـای لیـــزری حالـــت جامـــد قابـــل تنظـــیم متمرکـــز کردنـــد. ایـــن تحقیقـــات بـــه ســـاخت لیزرالکساندریت($cr:BeAl_2o_3$) در سال ۱۹۷۹، و ساخت بلور سفایرآلاییده با تیتانیوم در سال ۱۹۸۶ انجامید[۲].

در اوایل دهه۸۰ ، دو پیشرفت قابل توجه در تولید پالس‌های لیزری فمتوثانیه‌ایی پایدار بدسـت آمدند. اول اینکه یک روش قفل زنی مد غیرفعال جدید با عنـوان «قفـل زنـی مـدها بـا پـالس برخوردی (CPM)»[5] ابداع شد[۳]. ابداع این روش به تولید پالس‌هـای زیـر۱۰۰fsازلیزرهـای دای منجر شد. دومین پیشرفت قابل توجه در سال ۱۹۸۳ حاصل شد. در این سـال نشـان داده شد که پاشیدگی سرعت گروه(gvd) حاصل شده از انتشارنور در اجزای نوری داخـل کـاواک را می‌توان با بکارگیری یک جفت توری یا منشور در داخل نوسانگرلیزری جبران نموده وآن را بهینه کرد[۴].

گسترده طیفی بهره سـفایر آلاییـده بـا تیتانیوم(یـاقوت کبـود باتیتـانیوم) (Ti:Sapphire) در محدوده ۱۱۸۰nm-۶۰۰ است. این بدین معنی است که پهنای باند بهره بیش از۴۰۰nm است. با توجه به این نکته، توجه زیادی به این ماده معطوف شـد چـرا کـه در نظـر اول تولیـد منبـع لیزری قابل تنظیم از این ماده امکان‌پذیر بود. افزون بر این، با انجـام قفـل زنـی مـد در چنـین

[3]- mode locking
[4] - Day laser
[5]- colliding pulse mode locking (CMP)

لیزری ایجاد پالس‌هایی به کوتاهی۴fs قابل حصول می‌نمود. برای انجام عمل قفل زنی مد باید نوسانگر لیزری می‌توانست به صورت همزمان در تمام مدهای واقع بر زیر منحنی بهره نوسان کند و افزون بر تمام این مدها باید به صورت همفاز نگه داشته می‌شدند.

کارآمدترین روش قفل زنی مد، به عنوان ساز وکار اصلی تولید پالس‌های لیزری فمتوثانیه، در سال ۱۹۹۱ ارائه شد[۵]. این روش «خود قفل شدگی مد»[۶] یا «قفل شدگی مد از طریق عدسی کر(KLM)»[۷] نام گرفت. این پیشرفت عمده در فناوری پالس‌های لیزری فراکوتاه، به تولید پالس‌های ۶/۵fs از لیزر Ti:sapphire منجر شد، که کوتاه‌ترین پالس تولید شده از یک نوسانگر لیزری تا آن زمان بود [۶].

در بخش بعدی مطالعه اجمالی چگونگی تولید پرتو لیزری ارائه شده و در بخش‌های بعدی در مورد مکانیزم‌های تولید پالس‌های لیزری کوتاه و فراکوتاه بحث شده است.

۲-۱ مکانیزم‌های اصلی تولید پرتوهای لیزری

لیزرها در واقع نوسانگرهای نوری هستند. هر نوسانگری برای اینکه بتواند برای مدت زمانی معین نوسان کند به دو جزء اصلی نیاز دارد: تقویت (بهره) و پس خورد. در نوسانگرهای نوری (لیزرها) آنچه که تقویت (بهره) را تأمین می‌کند، گسیل تحریکی تابش در محیط بهره یا محیط لیزرزا است و آنچه که به فراهم آمدن پس خورد منجر می‌شود، استفاده از کاواک لیزری (آینه‌ها) است.

---

[6] – self – mode locking

[7]- Kerr lens mode locking (KLM)

آنچه که در کارکرد پالسی لیزر درجه اول اهمیت قرار می‌گیرد، قابلیت لیـزر در امکـان نوسـان چند مدی در داخل کاواک است. از این رو در این بخش مکانیزیم‌های اصلی دخیـل در تولیـد پرتو لیزری و نوسان چند مدی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱-۲-۱ گسیل تحریکی؛ ساز و کار ایجاد بهره

یک مجموعه متشکل از N اتم یکسان بـا دو تـراز انـرژی E_1, E_2 را در نظـر مـی‌گیـریم. بـه صورتی که تعداد اتم‌هایی که در آنها الکترون در تراز پایه است در واحـد حجـم N_1 باشـد و تعداد اتم‌هایی که در آنها الکترون در تراز برانگیخته اسـت، در واحـد حجـم برابـر N_2 باشـد. همچنین فرض می‌کنیم که این سیستم با یک پرتو نوری با n فوتون در ثانیه، در واحد حجم و با انرژی فوتونی $h\omega = E_2 - E_1$ نوردهی می‌شود. در انـدرکنش پرتـو نـوری بـا ایـن سیسـتم ممکن است سه فرایند مختلف رخ دهند: جذب، گسیل خود بخـودی و گسـیل تحریکـی. در فرایند جذب، یک فوتون جذب شده و انرژی آن به الکترون منتقل می‌شود و در نتیجه الکترون از تراز پایه به تراز برانگیخته گذار می‌کند و انرژی فوتون به صورت پتانسیل ذخیره مـی‌شـود. در فرایند گسیل خودبخودی الکترون با گسیل یک فوتون به تراز پایین می‌افتد. جهـت و فـاز فوتون گسیل شده در این فرایند نسبت به فوتـون اولیـه، کـاملاً تصـادفی اسـت. آنچـه کـه در لیزرزایی نقش اساسی را ایفا می‌کند، فرایند سوم یعنی گسیل تحریکی است. آلبرت اینیشتن در سال ۱۹۱۷ این نظریه را مطرح ساخت که کانال دیگری نیز وجـود دارد کـه اتـم مـی‌توانـد از طریق آن از حالت برانگیخته خارج شود. این کانال همان چیـزی اسـت کـه گسـیل تحریکـی نامیده شد. اگر الکترونی در تراز تحریکی قرار داشته باشـد و فوتـونی بـا مشخصـات فوتـون

منجر به جذب، از کنارآن بگذرد، این فوتون الکترون را وادارمی‌کند تا با گسیل دو فوتـون کـه تمام ویژگی‌های فوتون اولیه را دارا هستند به تراز پایه باز گردد.

در دماهای عادی (دمای اتاق) بیشتراتم‌ها در تراز پایه قراردارند. از ایـن رو پدیـده از ایـن رو پدیده غالب در اندرکنش نور باسیستم اتمی فرایند جذب خواهد بود. بنابراین نور با انتشـار از چنین محیطی تضعیف خواهد شد.

برای تقویت نور باید تجمع حالت برانگیخته ازتجمع حالت پایه بیشتر باشـد ($N_2 > N_1$). بـه چنین شرایطی تجمع معکوس[8] گفته می‌شود. در این شرایط گسیل تحریکی غالب خواهد بـود و تعداد فوتون‌ها طی یک فرایند زنجیره‌ایی به صورت نمایی افزایش می‌یابند. فوتون اولیـه بـه تولید دو فوتون همانند با خود با خود منجر می‌شود و هر کدام از این فوتون‌ها طی فرایندهایی مشابه فوتون‌های دیگری تولید می‌کنند و این فرایند ادامه می‌یابد. البته لازم به یـادآوری اسـت که وجود پدیده‌هایی نظیر اشباع باعث می‌شود تا رشد تعداد فوتون‌ها تا حـد مشخصـی ادامـه یابد. برای ایجاد تجمع معکوس باید از مکانیزم‌های دمش استفاده شود که طی آن الکترون‌ها از طریق فرایندهای نوری یا غیر نوری از تراز پایه به تراز تحریکی انتقال می‌یابند. البته باید گفت که سیستم دو ترازی ذکر شده، فقط به حالت ساده‌ایی است که از آن بـرای بیـان مفـاهیم پایـه استفاده می‌شود و در عمل، برای ایجاد پرتو لیزری از سـیتم‌هـای سـه تـرازی و چهـار تـرازی استفاده می‌شود.

---

[8]- population inversion

۲-۲-۱ ایجاد پس خورد؛ کاواک لیزری

حال ما می‌دانیم که چگونه از گسیل تحریکی استفاده کرده و نور را تقویت کنیم. همچنانکه گفته شد، در یک دید کلی می‌توان هر نوسانگر را به صورت ترکیبی از تقویت کننده و پس برخورد مثبت در نظر گرفت. برای اینکه نوسان وجود داشته باشد، مقدار بهره خالص باید حداقل یک مرتبه مقداری از اتلاف‌ها بزرگتر باشد. برای اینکه تداخل سازنده‌ایی بین موج ورودی و موج تقویت شده وجود داشته باشد، تغییر فاز ایجاد شده بوسیله حلقه پس خورد باید ضریب صحیحی از 2π باشد.

برای برآورده کردن این ملزومات محیط بهره در بین دو آینه با ضریب بازتابش زیاد قرار داده می‌شود. در واقع این چیدمان آینه‌ها، یک کاواک نوری تشکیل می‌دهند که نور می‌تواند در آن نوسان کرده و تقویت شود. بدین ترتیب پس از رفت و برگشت چندین باره نور در داخل محیط بهره، پرتو نوری همدوس بدست می‌آید که از طریق یکی از آینه‌ها که ضریب بازتابش آن کمتر از دیگری انتخاب شده است، از کاواک لیزری خارج می‌شود. (در محاسبات، خروجی به عنوان اتلاف در نظر گرفته می‌شود).

در ابتدا، هنگامی که تجمع معکوس ایجاد شد. یک فوتون که از گسیل خودبخودی حاصل شده و در راستای محور کاواک انتشار یافته است، می‌تواند فرایند گسیل تحریکی را آغاز کند. بعد از یک رفت و برگشت، اگر بهره بیشتر از اتلاف‌ها باشد، شدت موج الکترومغناطیسی مرئی بعد از هر رفت و برگشت به صورت تابع نمایی افزایش یافته و یک نوسان خود نگهدار ایجاد می‌شود. در داخل کاواک اتلاف‌های فروانی نیز وجود دارد که از جمله مهمترین آنها می‌توان به جذب در داخل محیط بهره، پراش از ناخالصی‌های موجود در داخل بهره، پراش از