٢٠١٨٢٦٠ - ١٤٢٠/٥/٢

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه ساخت و تولید

پایاننامه

جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک، ساخت و تولید

عنوان

بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر روی خواص مکانیکی اتصال جوشی

استاد راهنما

دکتر امیر مصطفی پور اصل

استاد مشاور

دکتر بهنام داودی

۱۳۸۹/۷/ ۳

اطلاعات مدارک علمی دریافت آوان

پژوهشگر

حمید حبیب زاده بوکانی

تابستان ۱۳۸۹

۱۴۲۰۵۲

تقدیر و تشکر

باور کردن گذر سریع روزگار دشوار اما خوشایند است. روزی را به یاد می آورم که هیچ نمی دانستم و امروز را می نگرم که مملو از آموخته های اساتیدم هستم. ذره ذره این آموخته ها حاصل لحظه لحظه ی دسترنج این بزرگواران است. قدردانی از این همه لطف و بزرگواری در هیچ کلام و نوشتاری نمی گنجد. تنها می توان گفت شاگردی این اساتید تا آخرین روز زندگی ام بزرگترین برگ افتخارم خواهد بود.

در این مجال لازم می دانم از زحمات همیشگی و الطاف بزرگوارانه آقای دکتر مصطفی پور که به حق همیشه بنده را مورد حمایتهای خود قرار داده اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشم و امیدوارم روزی لیاقت و توانایی این را داشته باشم که گوشه ای از زحمات ایشان را جبران نمایم.

زحمات استاد بزرگوار، جناب آقای مهندس ملتجی حق را با تمام وجودم ارج می نهم که در طی دوران تحصیلم در دانشگاه تبریز افتخار شاگردی ایشان را داشته ام.

جا دارد از همکاری دوستان بزرگوارم، آقایان مهندس داریوش کریمی، مهندس نوید حبیب زاده، مهندس معروفی آذر و مهندس منصور امینیان و از زحمات کارکنان شرکت جهاد تحقیقات سهند در انجام این پژوهش تقدیر و تشکری ویژه داشته باشم.

از خانواده ام و تمامی دوستانم که نقش بارزی در پیشرفت کارم داشته اند نهایت امتنان را دارم.

بنام هستی بخش یگانه

تقدیم به:

پدر عزیزم، معلمی که الفبای زندگی را به من آموخت

مادر مهربانم، فرشته ای که تار و پود وجودم را با عشق تنید

برادران بزرگوارم، که الهام بخش زندگی ام بوده اند

و

سرزمینم، که همواره در عطش خدمت به آن خواهم زیست.

نام خانوادگی: حبیب زاده بوکانی **نام:** حمید

عنوان پایان نامه:

بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری لیزر بر روی خواص مکانیکی اتصال جوشی

استاد راهنما: دکتر امیر مصطفی پور اصل

استاد مشاور: دکتر بهنام داودی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** ساخت و تولید

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فنی مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ التحصیلی:** ۱۳۸۹ **تعداد صفحه:**۱۲۴

کلید واژه ها: جوشکاری لیزر، استحکام شکست، کرنش شکست، میکروسختی، مدل رگرسیونی

چکیده:

در طی چند سال اخیر نیاز به سرعت و دقت بالاتر در تولید باعث شده است که فرایندهای نوین جوشکاری همچون جوشکاری با پرتو لیزر کاربرد وسیعتری در صنعت بیابند. سرعت بالا، کیفیت مناسب، عدم وجود تماس فیزیکی و قابلیت بالای اتوماسیون از مزایای جوشکاری با پرتو لیزر هستند. پارامترهای مختلفی در جوشکاری با پرتو لیزر وجود دارد که باید قبل از شروع جوشکاری تنظیم شوند. با توجه به تأثیر این پارامترها بر روی استحکام و کیفیت اتصال جوشی، هدف خود را در این پایان نامه مطالعه تأثیر پارامترهای سرعت حرکت قطعه کار، ولتاژ اعمالی به دستگاه جوشکاری لیزر و فرکانس پالسهای لیزر بر روی خواص مکانیکی اتصال جوشی تعریف نموده ایم. نمونه های مورد آزمایش، ورقهایی از جنس فولاد زنگ نزن AISI۳۲۱ می باشند. در ابتدا جهت کاهش تعداد آزمایشهای لازم، طراحی آزمایشات با روش RSM انجام شده است و سپس با اعمال تغییر بر روی سه پارامتر فوق الذکر چندین عمل جوشکاری با استفاده از لیزر Nd:YAG بر روی نمونه های آماده شده انجام گرفته است. در نهایت خواص مکانیکی نمونه های جوشکاری شده بصورت عملی و با انجام آزمایشهای کشش و میکروسختی سنجی اندازه گیری شده است. سپس با استفاده از نتایج این آزمونها، مدلهایی تقریبی برای تخمین استحکام و کرنش شکست بر حسب پارامترهای ورودی ارائه شده است. ولتاژ لیزر و سرعت جوشکاری اثر مثبتی بر استحکام و کرنش شکست داشته اند اما فرکانس تقریباً بر هر دو، بی تأثیر بوده است. فلز جوش و ناحیه HAZ دچار افت سختی نسبت به فلز پایه شده اند که این افت در ناحیه HAZ بسیار بیشتر بوده است نتایج حاصل از این پایان نامه می تواند در بهینه سازی پارامترهای جوشکاری لیزری بکار برده شود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	
مقدمه	۱

بخش اول: بررسی منابع (پایه های نظری و پیشینه تحقیق)

فصل اول معرفی لیزر و کاربردهای آن

۱-۱ مقدمه	۳
۱-۲ ماهیت لیزر	۳
۱-۳ اساس کار لیزر	۴
۱-۳-۱ وارونگی جمعیت	۴
۱-۳-۲ انتشار تحریک شده	۷
۱-۳-۳ تقویت	۷
۱-۴ اجزای دستگاه لیزر	۹
۱-۴-۱ ماده فعال	۹
۱-۴-۱-۱ مواد گازی	۹
۱-۴-۱-۲ مواد مایع	۱۰
۱-۴-۱-۳ مواد جامد عایق کاری شده	۱۱
۱-۴-۱-۴ نیمه رساناها	۱۲
۱-۴-۲ ساز و کار تحریک	۱۲
۱-۴-۲-۱ تحریک الکتریکی	۱۲
۱-۴-۲-۲ تحریک اپتیکی	۱۳
۱-۴-۲-۳ تحریک شیمیایی	۱۴
۱-۴-۳ حفره نوری	۱۴

۱-۴-۴ تجهیزات خروجی ۱۵
۱-۵ خواص انتشار لیزر ۱۷
۱-۵-۱ تکفامی ۱۷
۱-۵-۲ موازی بودن ۱۷
۱-۵-۳ همدوسی پرتو ۱۸
۱-۵-۴ درخشندگی ۱۸
۱-۵-۵ ابعاد نقطه کانونی ۱۸
۱-۵-۶ مدهای عرضی ۱۹
۱-۵-۷ مدهای زمانی ۲۰
۱-۵-۷-۱ پالسی کردن نرمال ۲۱
۱-۵-۷-۲ Q-Switching ۲۱
۱-۵-۷-۳ Mode Locking ۲۲
۱-۶ انواع لیزرهای صنعتی ۲۲
۱-۶-۱ لیزر CO_2 ۲۳
۱-۶-۲ لیزر $Nd:YAG$ ۲۵
۱-۶-۳ مقایسه ای بین لیزر CO_2 و لیزر $Nd:YAG$ ۲۷
۱-۶-۴ نکاتی در مورد فیبر نوری و بازده Wall Plug ۲۸
۱-۷ کاربردهای لیزر ۳۱
۱-۷-۱ فرایندهای آترمال ۳۱
۱-۷-۱-۱ اثرات فوتوالکتریکی ۳۱
۱-۷-۱-۲ اثرات فوتوشیمیایی ۳۱
۱-۷-۱-۳ اثرات فوتوفیزیکی ۳۱
۱-۷-۲ فرایندهای گرمایی ۳۲
۱-۷-۲-۱ عملیات سطحی با لیزر ۳۳
۱-۷-۲-۲ برش با لیزر ۳۴
۱-۷-۲-۳ ماشینکاری با لیزر ۳۵
۱-۷-۲-۴ نمونه هایی از کاربرد لیزر ۳۶
۱-۸ جوشکاری با پرتو لیزر ۳۸
۱-۸-۱ جوشکاری سوراخ کلیدی ۳۹

۱-۸-۲ جوشکاری هدایتی ۴۰
۱-۸-۲-۱ اصول جوشکاری هدایتی ۴۱
۱-۸-۲-۲ انتخاب فرایند ۴۱
۱-۸-۲-۳ کاربردهای صنعتی ۴۴
۱-۸-۳ پارامترهای جوشکاری لیزر و تاثیرات آنها ۴۵
۱-۸-۳-۱ ابعاد، عمق و محل نقطه کانونی ۴۶
۱-۸-۳-۲ گازهای محافظ برای جوشکاری با لیزر Nd:YAG ۴۸
۱-۸-۳-۳ توان لیزر و سرعت جوشکاری ۴۹
۱-۸-۴ مقایسه با تکنیکهای جوشکاری دیگر ۵۱

فصل دوم فولادهای مقاوم به خوردگی

۲-۱ مقدمه ۵۴
۲-۲ معرفی فولادهای مقاوم به خوردگی ۵۴
۲-۲-۱ فولادهای مقاوم به خوردگی آستنیتی ۵۵
۲-۳ جوشکاری فولادهای مقاوم به خوردگی آستنیتی ۵۷
۲-۳-۱ جنبه های خاص تکنیکهای جوشکاری بکار رفته برای فولاد ضد زنگ آستنیتی و مقاوم به گرما ۶۱
۲-۴ مسیر انجماد پس از جوشکاری فولاد مقاوم به خوردگی آستنیتی ۶۱
۲-۴-۱ فلز جوش ۶۱
۲-۴-۱-۱ انجماد از نوع AF ۶۲
۲-۴-۱-۲ انجماد از نوع FA ۶۲
۲-۴-۱-۳ تأثیر مفید انجماد فریت به عنوان فاز اولیه ۶۵
۲-۴-۲ ناحیه متاثر از گرما ۶۷
۲-۴-۲-۱ رشد دانه ها ۶۷
۲-۴-۲-۲ رسوب ۶۷
۲-۴-۳ استفاده از دیاگرامهای پیش بینی کننده ۶۷

فصل سوم آزمایشهای مکانیکی مواد

۳-۱ مقدمه ۷۲

۳-۲ آزمون کشش ۷۲

۳-۲-۱ آزمون کشش اتصالات جوشی ۷۴

۳-۲-۲ آماده سازی نمونه های آزمون کشش ۷۵

۳-۳ آزمون سختی سنجی ۷۵

۳-۳-۱ آزمون میکروسختی سنجی ۷۶

فصل چهارم پیشینه تحقیق

۴-۱ مقدمه ۷۹

۴-۲ پیشینه تحقیق ۷۹

بخش دوم: مواد و روشها

فصل پنجم تجهیزات و مواد

۵-۱ مقدمه ۸۳

۵-۲ دستگاه جوشکاری لیزر ۸۳

۵-۳ مواد اولیه ۸۵

۵-۴ مراحل آماده سازی قطعات ۸۷

۵-۵ طراحی آزمایشات، پارامترهای ثابت و متغیر آزمایش ۹۲

بخش سوم: نتایج و بحث

فصل ششم نتایج و بحث

۶-۱ مقدمه ۹۵
۶-۲ انتخاب جوشکاری لیزر ۹۵
۶-۳ نتایج آزمایشات ۹۶
۶-۴ ارائه مدلهای رگرسیونی مناسب برای تخمین مقادیر خروجی ۹۹
۶-۴-۱ استحکام شکست ۹۹
۶-۴-۱-۱ مدل رگرسیونی و جدول آنالیز واریانس ۹۹
۶-۴-۱-۲ بررسی کفایت مدل و آزمایشها ۱۰۰
۶-۴-۲ کرنش شکست ۱۰۱
۶-۴-۲-۱ مدل رگرسیونی و جدول آنالیز واریانس ۱۰۱
۶-۴-۲-۲ بررسی کفایت مدل و آزمایشها ۱۰۲
۶-۵ بررسی تاثیر مقادیر ورودی روی مقادیر خروجی ۱۰۳
۶-۵-۱ استحکام شکست ۱۰۳
۶-۵-۱-۱ ولتاژ ۱۰۳
۶-۵-۱-۲ سرعت ۱۰۵
۶-۵-۱-۳ فرکانس ۱۰۷
۶-۵-۲ کرنش شکست ۱۰۹
۶-۵-۲-۱ ولتاژ ۱۰۹
۶-۵-۲-۲ سرعت ۱۰۹
۶-۵-۲-۳ فرکانس ۱۱۰
۶-۶ بررسی گسترده تر اثرات مقادیر ورودی روی مقادیر خروجی ۱۱۱
۶-۶-۱ استحکام تسلیم ۱۱۱
۶-۶-۲ کرنش شکست ۱۱۳
۶-۷ اعتبارسنجی مدلها ۱۱۴
۶-۸ میکروسختی اتصال ۱۱۵

فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱ مقدمه ۱۱۸

۷-۲ نتایج ۱۱۸

۷-۳ پیشنهادات ۱۱۹

منابع و مراجع ۱۲۱

مقدمه

جوشکاری با پرتو لیزر امروزه به یکی از فرایندهای مهم اتصال دهی برای گستره وسیعی از مواد فلزی و غیر فلزی تبدیل شده است. با پیشرفت لیزرهای پر توان در دهه های اخیر، می توان قطعات با ضخامت بیشتر را هم با سرعت بالا و کیفیت مناسب به یکدیگر جوش داد. با توجه به عدم وجود تماس فیزیکی، این روش قابلیت بالایی برای اتوماتیک شدن داشته که منجر به دستیابی به مزیت های اقتصادی بالایی می شود. توسط این روش می توان اتصالاتی بدون عیب، با سرعت و قابلیت تکرارپذیری بالا ایجاد کرد.

با توجه به مزیت هایی از قبیل پرتو لیزر متمرکز، سرعت بالا، ناحیه تحت تأثیر از گرمای کوچک، کیفیت جوش مناسب و گرمای ورودی کم، صنایع روی به استفاده از جوشکاری لیزر آورده اند. مقوله سرعت بالای جوشکاری سبب شده تا در صنایعی که نیاز به سرعت بالا در تولید وجود دارد استفاده از جوشکاری لیزر رواج یابد؛ می توان در این زمینه به صنایع خودروسازی اشاره کرد.

پارامترهای مختلفی در جوشکاری با لیزر وجود دارد که باید قبل از شروع جوشکاری تنظیم شوند. با توجه به تأثیر این پارامترها بر روی اتصال جوشی، هدف ما در این پژوهش یافتن تأثیر پارامترهای جوشکاری بر روی خواص مکانیکی اتصال جوشی است. در این تحقیق با استفاده از لیزر Nd:YAG ورقهای فولاد ضد زنگ آستنیتی AISI ۳۲۱ جوشکاری شده و تاثیر پارامترهای ولتاژ اعمالی به دستگاه جوشکاری، سرعت حرکت قطعه کار و فرکانس پالسهای لیزر روی خواص مکانیکی بررسی گردیده است. برای طراحی آزمایشات از روش پاسخ رویه سطح استفاده شده است. پس از انجام آزمایشات عملی و تحلیل آنها ابتدا مدلهایی برای مقادیر خروجی از روی مقادیر ورودی ارائه گردیده است. سپس تأثیر پارامترهای ورودی بر روی متغیرهای خروجی (استحکام و کرنش شکست) بررسی شده است. در نهایت میکروسختی نواحی مختلف اتصال مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در فصل اول به معرفی لیزر و کاربردهای صنعتی آن پرداخته شده است. فصل دوم حاوی مطالبی در مورد فولادهای مقاوم به خوردگی و جوشکاری آنهاست. در فصل سوم مطالبی در مورد آزمایشهای مکانیکی مواد بیان شده است. فصل چهارم مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه جوشکاری لیزر را شامل می شود. در فصل پنجم مطالبی در مورد مواد، تجهیزات و آزمایشهای انجام گرفته بیان شده است. در این فصل آماده سازی نمونه ها، شرایط جوشکاری و چگونگی انجام آزمونهای مکانیکی بحث شده است. فصل ششم حاوی جداول، پاسخها و نتایج آزمایشات همراه با بحث و بررسی آنهاست. فصل هفتم هم جمع بندی مطالب و مرور نتایج کلی این پژوهش را در بر می گیرد.

فصل اول

معرفی لیزر و کاربردهای آن

۱-۱ مقدمه

مفهوم لیزر را برای اولین بار انیشتین در سال ۱۹۱۷و در هنگام ارائه نظریه کوانتوم بیان کرد. اما اولین لیزر نیم قرن بعد توسط مایمن[۱] در سال ۱۹۶۰ و با کریستال روبی به نمایش درآمد. پس از تولید اولین لیزر قابل استفاده در صنعت، تمایل به استفاده از این فناوری نوین به سرعت گسترش یافت. به زودی لیزر در فرایندهای مختلف صنعتی بکار گرفته شد. دقت، سرعت و صرفه جویی در نیروی کار کلماتی بودند که با لیزر عجین گشته بودند و برای صاحبان صنایع بسیار اغوا کننده بودند. همزمان با افزایش تقاضا برای بکارگیری لیزر در صنعت، علم تولید لیزر نیز گسترش یافت و هر روز لیزرهای با توان بیشتر وارد بازار شدند. امروزه مواد بسیاری وجود دارند که در تولید لیزر بکار گرفته می شوند و هر کدام کاربرد خاص خود را در صنایع مختلف دارند. ویژگیهایی چون انرژی بالا، سرعت زیاد و پرتو متمرکز باعث شده تا لیزر در جوشکاری نیز به عنوان منبع حرارتی مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر خواص فوق، از لحاظ زیست محیطی هم فرایندهای لیزری پاکتر از فرایندهای معمولی تولید بوده و تقریباً بی صدا می باشند و با توجه به اهمیت بحث گرمایش زمین و آلودگی صوتی فرایندهای لیزری در مرتبه بالاتری نسبت به سایر فرایندها قرار می گیرند.

۱-۲ ماهیت لیزر

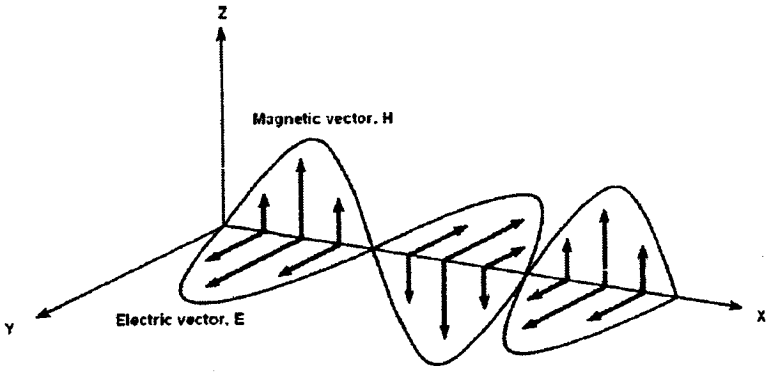
لیزر پرتو نوری موازی و همدوس[۲] (موجهای هم فاز و با طول موج برابر) را تولید می کند. این نور کاملاً متفاوت از نور غیر همدوس خورشید است. پرتوهای نوری موازی و با طول موج برابر که پرتو لیزر را تشکیل می دهند دارای چگالی توان بالا بوده و نسبت به نور خورشید قابلیت متمرکز شدن بیشتری دارد. در نتیجه با لیزر می توان چگالی توان بهینه تری را بدست آورد.

کلمه لیزر (LASER) یک کلمه اختصاری است که از حروف اول کلمات تقویت نور تحریک شده با انتشار پرتوافکنی[۳] تشکیل شده است و اشاره دارد به فرایندی که طی آن پرتو تولید می شود.[۱]

پرتو لیزر یک نوع انتشار الکترومغناطیسی است. بنا بر نظریه موجی انتشار الکترومغناطیسی از موجهای در حال گسترشی تشکیل شده است که این موجها شامل میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی هستند (شکل۱-۱). این میدانها نسبت به یکدیگر و نسبت به جهت انتشار عمود می باشند. طول موج و فرکانس همه امواج الکترومغناطیسی دارای رابطه زیر با یکدیگر می باشند:

$$c = n\lambda \qquad (۱-۱)$$

۱- T.H. Maiman
۲- coherent
۳- Light Amplification Stimulated by Emission of Radiation



شکل (۱-۱) نوسان بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی در یک موج الکترومغناطیسی صفحه ای [۲]

که c سرعت نور در خلأ می باشد($۲٫۹۹۷۹\times۱۰^{۸}$ m/s) . قدرت انتشار الکترومغناطیسی غالباً با شدت انتشار بیان می شود. شدت عبارتست از انرژی در واحد سطح عمود بر جهت حرکت موج و متناسب با مربع دامنه موج است. چنان که در شکل(۱-۲) مشاهده می شود بر اساس طول موج (یا فرکانس تقسیم بر انرژی) طیف الکترومغناطیسی به نواحی مختلفی تقسیم می شود. به ترتیب کاهش طول موج این نواحی عبارتند از: امواج رادیویی، امواج میکروویو، انتشار مادون قرمز، نور مرئی، انتشار ماورای بنفش، اشعه X، و اشعه گاما.[۲] در پردازش مواد بیشتر از لیزرهایی در بازه های مادون قرمز، نور مرئی و ماورای بنفش استفاده می شود.[۳]

با توجه به عدم توانایی نظریه نور موجی در تشریح بسیاری از مسائل، نظریه کوانتوم مطرح گردید. طبق این نظریه، انتشار الکترومغناطیسی شامل جریانی از ذرات به نام فوتون است. هر فوتون متناسب با فرکانس خود دارای انرژی مخصوصی است:

$$E = hn \qquad (۱-۲)$$

که h ثابت پلانک نام دارد ($۶٫۶۳\times۱۰^{-۳۴}$ J/s). پس انتشار الکترومغناطیسی طبیعت دوگانه ای دارد: گاهی طبیعت ذره ای و گاهی طبیعت موجی.[۲]

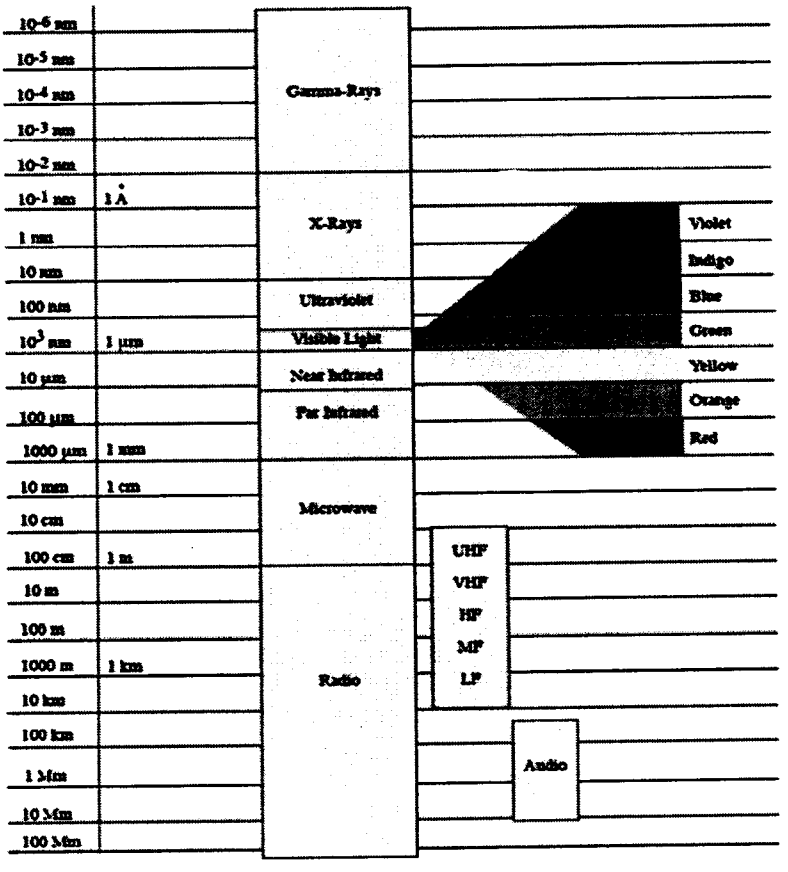
۱-۳ اساس کار لیزر

لیزر بر اساس سه اصل مشخص کار می کند: وارونگی جمعیت، انتشار برانگیخته و تقویت.

۱-۳-۱ وارونگی جمعیت[۴]

وارونگی جمعیت اصل لازم برای انتشار برانگیخته است در غیر اینصورت تنها جذب خالص انتشار به جای انتشار برانگیخته رخ خواهد داد.[۲] اتمها را می توان به صورت یک هسته با بار مثبت که توسط الکترونهای منفی احاطه شده است در نظر گرفت. الکترونها در لایه های کوانتومی مشخصی به دور هسته در حال دوران می باشند و الکترونهای حاضر در یک لایه مشابه دارای انرژی تقریباً یکسان هستند.[۳] بر اساس قانون بولتزمان، سطوح انرژی بالاتر جمعیت کمتری را در خود دارند و جمعیت الکترونها در سطوح انرژی بالاتر تحت یک رابطه نمایی با انرژی کاهش می یابد. در

۴- population inversion



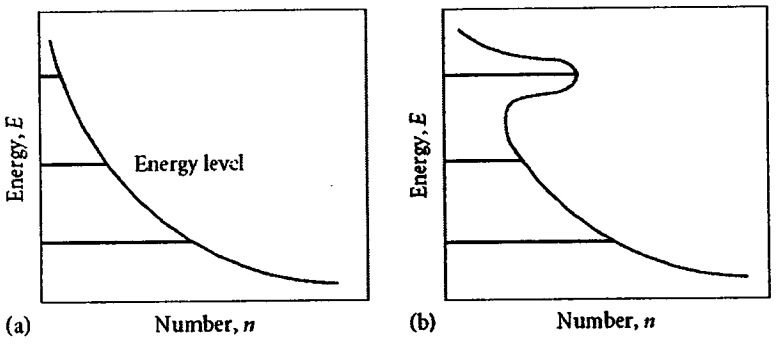
شکل (۱-۲) طیف الکترومغناطیسی [۲]

شکل(۱-۳) مشاهده می شود که وارونگی جمعیت بیانگر یک توزیع غیرتعادلی از الکترونهاست به طوری که سطوح بالاتر انرژی دارای الکترونهای بیشتری نسبت به سطوح پایین تر انرژی هستند. فرایند تولید وارونگی جمعیت با تحریک الکترونها به سطوح بالاتر انرژی، پمپینگ[۵] نامیده می شود.[۲] عمل تحریک یا پمپینگ را می توان توسط منبع الکتریکی، نوری و شیمیایی انجام داد. با توجه به اینکه گازها به عنوان ماده لیزر، بازه های گسسته ای از طول موجها را جذب می کنند در نتیجه استفاده از تحریک الکتریکی که انرژی را در بازه وسیعی از طول موجها تولید می کند، در لیزرهای گازی قابل قبول است. با توجه به اینکه جامدات را نمی توان با منبع الکتریکی به خوبی تحریک نمود، استفاده از تحریک نوری بیشتر مورد استفاده است. روشهای تحریک شیمیایی بسیار به سختی کنترل می شوند اما در لیزرهای شیمیایی استفاده می شوند.

ساده ترین حالت انتشار لیزر، انتقال بین دو سطح انرژی E_1 و E_2 یعنی سطح خنثی و سطح برانگیخته است. لیزر آمونیاک و لیزر دیودی بر اساس حالت دو سطحی کار می کنند. در این حالت نمی توان شدت پرتو کافی داشت زیرا با انتشار پرتو، تعداد اجزای سطح لیزر بالایی برابر تعداد اجزای سطح خنثی شده و تقریباً جذب برابر صفر می شود.

لیزرهای سه مرحله ای با پمپ شدن اجزا به سطح انرژی جذب یعنی E_2 آغاز می شود. اگر سطح انرژی E_3 وجود داشته باشد که درست زیر E_2 قرار دارد، کاهش بدون انتشار به سطح انرژی E_3 اتفاق افتاده و E_3 سطح بالایی لیزر نام می گیرد. در شکل(۱-۴) مشاهده می شود که انتشار لیزر با انتقال از سطح E_3 به سطح E_1 اتفاق می افتد. بایستی

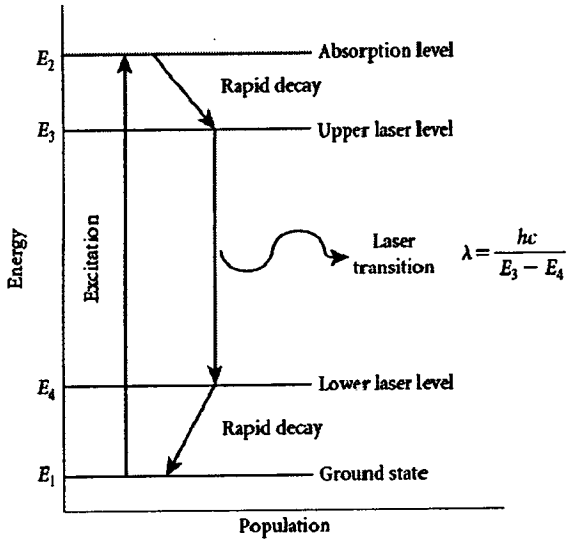
۵- pumping



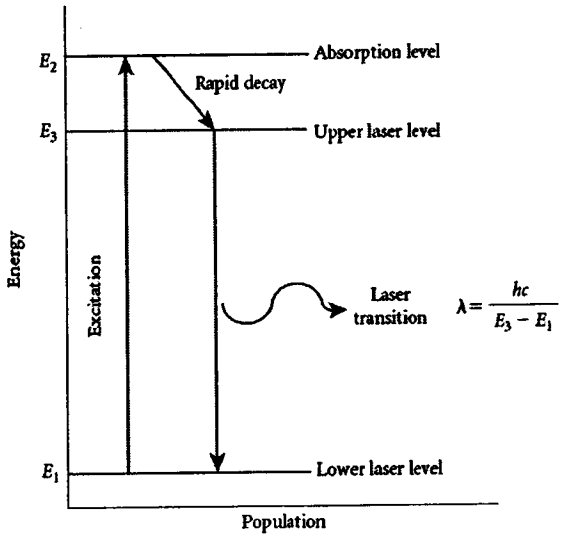
شکل(۱-۳) توزیع انرژی در اجزا در حالت (a) تعادل ترمودینامیکی و (b) وارونگی جمعیت[۳]

شرایطی وجود داشته باشد تا این لیزرها عمل نمایند. انرژی لازم برای تحریک بایستی نسبتاً بالا باشد زیرا بیش از نصف جمعیت اجزا بایستی از حالت خنثی خارج شوند. دوم اینکه انتقال از $E_۳$ به $E_۱$ بایستی بسیار محتمل باشد. سوم اینکه اجزا بایستی مدت زمان بیشتری در سطح $E_۳$ به نسبت سطح $E_۱$ بمانند تا وارونگی جمعیت اتفاق بیافتد. اگر در سیستم سه مرحله ای، سطح لیزر پایینی همان سطح خنثی باشد وارونگی جمعیت بسیار سخت تر اتفاق می افتد و خروجی تنها به حالت پالسی محدود می شود.

چنان که در شکل(۱-۵) دیده می شود در حالت چهار مرحله ای سطح پایینی لیزر با سطح انرژی خنثی یکی نیست در نتیجه وارونگی جمعیت بهتر اتفاق می افتد. اجزا تحریک شده و به سطح انرژی $E_۲$ می روند سپس کاهش بدون انتشار اتفاق افتاده و به سطح $E_۳$ تنزل می یابند و در نهایت انتشار پرتو در اثر انتقال از سطح انرژی $E_۳$ به سطح انرژی میانی $E_۴$ اتفاق می افتد. نهایتاً در یک فرایند مطلوب اجزا به سطح $E_۱$ انتقال می یابند. پتانسیل انتشار در سیستمهای چهار مرحله ای بیشتر از سیستمهای سه مرحله ای است زیرا انرژی حدی جهت پمپ کردن اجزا به طور فاحشی کمتر می باشد زیرا لازم نیست که همه جمعیت وارونه شود. با توجه به اینکه انتشار در سیستم چهار مرحله ای با انتقال از سطح انرژی $E_۳$ به سطح $E_۴$ انجام می شود و این سطح انرژی میانی به طور نرمال خالی از جمعیت است لیزر چهار مرحله ای می تواند در حالت پیوسته کار کند.[۳]



شکل(۱-۵) انتقال انرژی در سیستم لیزر چهار مرحله ای[۳]



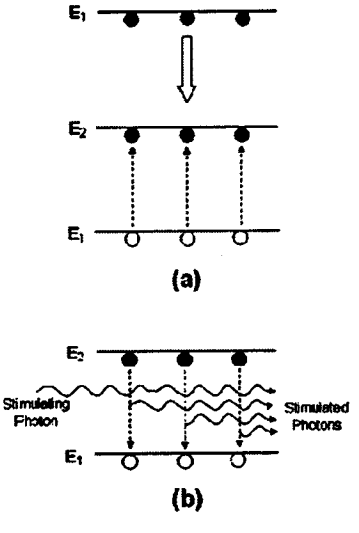
شکل(۱-۴) انتقال انرژی در سیستم لیزر سه مرحله ای[۳]

۱-۳-۲ انتشار تحریک شده

بر اساس فرضیات انیشتین پرتو نور از بسته های انرژی موجی به نام فوتون تشکیل شده است. پیش از انیشتین فرض می شد تنها دو حالت تماس فوتون و اجزا وجود دارد اول جذب فوتون توسط اجزا و افزایش انرژی آنها و دوم انتشار خود به خودی فوتون از اجزای با انرژی بالا و کاهش انرژی آنها اما انیشتین عنوان نمود که مکانیزم سومی به نام انتشار تحریک شده وجود دارد که در آن یک فوتون در برخورد با یک جزء تحریک شده باعث برانگیخته شدن آن و انتشار فوتون دیگری می شود. البته حالتی هم وجود دارد که یک جزء انرژی خود را از دست می دهد بدون اینکه فوتونی آزاد نماید که به آن کاهش بدون انتشار می گویند.[۳] انتشار تحریک شده زمانی اتفاق می افتد که فوتون ورودی با فرکانس υ به طوری که:

$$h\upsilon = (E_2 - E_1)/h \qquad (۳-۱)$$

با اتم تحریک شده ماده فعالی که دچار وارونگی جمعیت بین حالتهای ۱ و ۲ با انرژهای E_1 و E_2 شده است برخورد کند.[۲] فوتون در جهت مشابهی با فوتون ورودی حرکت نموده تا اینکه به جزء دیگری برخورد نماید و بدین صورت یک چگالی در حال افزایش از فوتونها تولید می شود. فوتونها در فاز مشابه هستند چه از نظر زمانی چه از نظر فضایی و به عبارتی دارای قطبیت و فرکانس یکسان هستند. در این صورت پرتو لیزر همدوس، تکفام، با واگرایی کم و درخشندگی بالاست.[۳] شکل(۱-۶) عملیات فوق را به صورت شماتیک نشان می دهد.



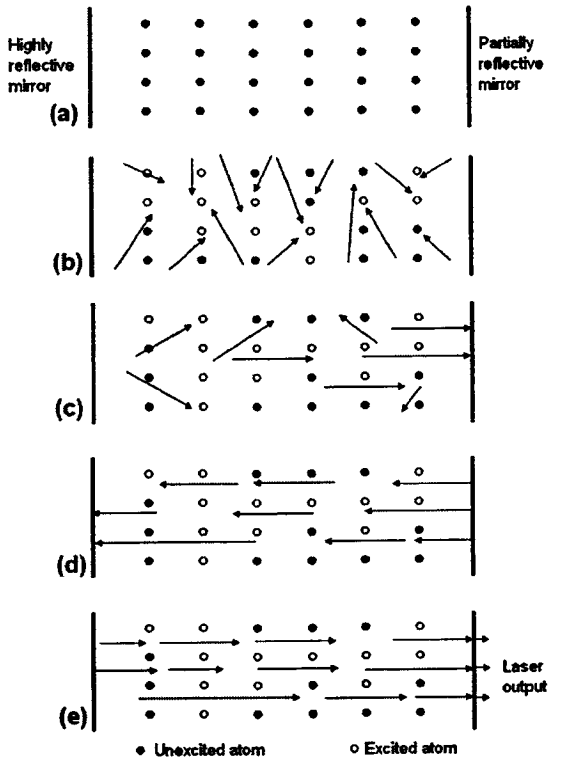
شکل(۱-۶) شکل شماتیک از عملیات لیزر (a) پمپینگ و (b) انتشار تحریک شده[۲]

۱-۳-۳ تقویت

با توجه به اینکه فوتونهای تحریک شده دارای قطبیت و فاز مشابه هستند، به صورت سازنده ای به فوتونهای ورودی اضافه شده و منجر به تقویت آنها می شوند. بدین طریق تقویت پرتو لیزر با انتشار تحریک شده تابشی بدست می آید. تقویت پرتو لیزر در یک حفره تشدید کننده که از آینه های بازتاب دهنده در دو انتها و عمود بر محور حفره تشکیل شده است، انجام می پذیرد. ماده فعال لیزر در بین این آینه ها قرار می گیرد. معمولاً یکی از آینه ها کاملاً

بازتاب دهنده با میزان بازتاب دهندگی ۱۰۰٪ است در حالی که آینه دیگر نیمه شفاف بوده تا بتوان از لیزر خروجی گرفت. در شکل زیر عمل تقویت در یک حفره با دو آینه تخت در طرفین دیده می شود. وقتی که لیزر خاموش است، حفره نوری شامل ماده فعال به صورت تحریک نشده است. تحریک اتمها (وارونگی جمعیت) با پمپینگ نوری اتفاق می افتد. سپس انتشار تحریک شده بوجود می آید و شدت آن با حرکت به سمت آینه های انتهایی افزایش می یابد. تقویت بیشتر با بازتاب فوتونها به درون ماده فعال انجام می پذیرد. فوتونها در داخل ماده لیزر مرتباً حرکت کرده و باعث انتشار تحریک شده بیشتر می شوند که در نهایت به صورت پرتو لیزر با شدت بالا از یکی از آینه ها خارج می شود.

برای شروع و ادامه انتشار لیزر میزان حصول و بهره در حفره تشدید بایستی به اندازه ای بالا باشد که بر اتلاف ها غلبه نماید. اتلاف ها ممکن است به صورت تجزیه و انکسار در لبه های آینه ها، جذب و پراکنده شدن در آینه و جذب و پراکنده شدن در ماده فعال اتفاق بیافتد. در صورتی که اتلاف ها بیش از میزان حصول باشد، عمل لیزینگ متوقف می شود.[۲] شکل(۱-۷) نحوه تقویت پرتو تولید شده در حفره لیزر را نشان می دهد.



شکل(۱-۷) مراحل تقویت: (a) حالت تحریک نشده اولیه (لیزر خاموش)، (b) پمپینگ نوری که منجر به حالت تحریک شده می شود، (c) شکل گیری انتشار تحریک شده، (d) تقویت با انتشار تحریک شده و (e) تقویت مداوم به دلیل بازتاب های متعدد از آینه های انتهایی و خروج متعاقب لیزر از یکی از آینه ها[۲]

۱-۴ اجزای دستگاه لیزر

۱-۴-۱ ماده فعال

این ماده می تواند گاز، مایع، جامد عایق کاری شده و نیمه رسانا باشد.

۱-۴-۱-۱ مواد گازی

مواد گازی به عنوان ماده فعال مزیتهایی دارند از جمله: آنها را می توان براحتی توسط جریان الکتریکی تحریک نمود، گازها همگن هستند، انعطاف پذیری زیادی در طراحی تشدید کننده گازها وجود دارد، گسترش و انتشار پرتو بدون تأخیر است و نسبتاً ارزان قیمت هستند. انتشار لیزر از گازها در سه قسمت گسسته از طیف الکترومغناطیسی اتفاق می افتد: ماورای بنفش، نور مرئی و مادون قرمز. گازهای نجیب نئون، آرگون، کریپتون و زنون و مخلوط هلیوم و نئون ماده فعال لیزر گازها اتمی خنثی محسوب می شوند. انرژی منتشر شده و حداکثر دمای تولید شده در تشدید کننده با طول موج لیزر تولیدی نسبت عکس دارد. در نتیجه لیزرهای اتمی گازی با تخلیه ضعیف کار کرده و تقویت و توان خروجی متوسطی دارند. از این لیزرها می توان در کارهای با مقیاس کوچک و پردازش مواد با توان پایین و دقت بالا استفاده نمود. شکل(۱-۸) ساختار کلی یک حفره گازی را نشان می دهد.

انرژی تحریک یک یون بزرگتر از یک مولکول خنثی است در نتیجه لیزرهای گاز یونیزه شده پرتوهای با طول موج کوتاه تولید می کنند. جریانهای با چگالی بالا برای برانگیخته نمودن آنها لازم است زیرا انرژی صرف یونیزه کردن اتم و سپس برانگیخته نمودن آن می شود. این لیزرها پلاسماهایی با دمای بالا دارند و به خنک کاری اساسی در هنگام کار کردن نیاز دارند. یونهای گازهای نجیب در لیزرهای تجاری مورد استفاده قرار می گیرند و پرتوهای ماورای بنفش تولید می کنند.

مولکولها پرتوهایی با طول موج زیاد تولید می کنند. انتقالها در مولکولها شامل انتقال بین سطوح انرژی مختلف ارتعاشی و دورانی در مولکول است. دو حالت مختلف اتفاق می افتد: انتقال بین سطوح ارتعاشی مختلف در حالت الکترونی ثابت مانند آنچه که در دی اکسید کربن اتفاق می افتد و انتقال بین سطوح انرژی مختلف و با حالت الکترونی متغیر مانند آنچه که در نیتروژن اتفاق می افتد. با توجه به اینکه در حالت الکترونی خنثی، سطوح انرژی ارتعاشی نزدیک به سطح انرژی مولکول خنثی است انرژی فوتونها بخش بزرگی از انرژی تحریک است که منجر به بازده کوانتومی بالا می شود و تقریباً تمام الکترونهای حاضر در تخلیه، در فرایند برانگیخته نمودن شرکت می کنند. مولکولهای دو الکترونی برای انتشار لیزر پیوسته نا مناسب می باشند و دلیل آن طول عمر کم آنها در سطوح مختلف ارتعاشی در حالت الکترونی خنثی است. به طور مشخص دو مولکول وجود دارند که ساطع کنند های خوبی هستند: مونوکسید کربن و دی اکسید کربن. از چگالی جریان متوسط جهت تحریک آنها استفاده می شود اما قابلیت بکارگیری حجم های بالا باعث می شود تا خروجی چندین کیلو واتی تولید شود. در موارد جدید هم از انتقال بین حالتهای الکترونی مختلف بخار فلزات استفاده می شود.

کلمه اکزایمر (excimer) از ترکیب دو کلمه *دی مر تحریک شده (Excited Dimer)* شکل گرفته است، که مولکولی دو اتمی است که بر اثر یک واکنش شیمیایی شکل گرفته است و این واکنش ناشی از تحریک یک یا هر دو