



دانشگاه شاهرود
پایه

جوشکاری با لیزر، اصول و کاربردها

دکتر کیوان محموداقدمی

امروز کتابخوانی و علم‌آموزی نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.^۱

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتابخوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه مطالعه هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین سوره‌ای که بر آن فرستاده عظیم‌الشأن خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد

1. <https://farsi.khamenei.ir/message-content?id=2696>

شده است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده اند.

دانشگاه پیام نور با گستره جغرافیایی ایران شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه جا و همه وقت، به عنوان دانشگاهی کتاب محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره گیری از تجربه های گرانقدر استادان و صاحب نظران برجسته کشورمان، کتاب ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه مهم و خطیر یاری رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه خطیر یاری می رسانند، سپاسگزاری می نمایم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام نور را منزلگاه اندیشه سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام نور

فهرست مطالب

نه	پیشگفتار
یازده	راهنمای مطالعه کتاب
سیزده	هدف کلی کتاب
۱	فصل اول: انواع لیزرها و مشخصه‌های آنها برای جوشکاری
۱	۱-۱ اصول لیزر
۳	۲-۱ اصول تابش لیزر
۳	۱-۲-۱ انواع جذب و گسیل در محیط بهره
۶	۲-۲-۱ فرایند دمش و ایجاد وارونی جمعیت
۱۱	۳-۲-۱ نقش کاواک نوری
۱۵	۴-۲-۱ طیف خروجی از یک نوسانگر لیزری
۱۷	۵-۲-۱ شرایط عملیاتی در کاواک
۲۵	۳-۱ انواع و مشخصه‌های لیزرهای صنعتی
۲۷	۴-۱ لیزر دی‌اکسیدکربن (CO_2)
۲۹	۵-۱ لیزر یاگ (YAG)
۳۱	۶-۱ لیزر دیودی
۳۳	۷-۱ لیزر دیسکی
۳۴	۸-۱ لیزر فیبری
۳۷	۹-۱ لیزر سبز یا آبی
۳۸	۱۰-۱ لیزر پالسی فوق کوتاه پیکوثانیه یا فمتوثانیه‌ای
۴۱	فصل دوم: اصول اندرکنش لیزر- ماده و سیستم‌های نوری جنبی
۴۱	۱-۲ جذب، عبور و بازتاب لیزر از مواد
۴۲	۲-۲-۱ مورویری بر نظریه اندرکنش نور لیزر با ماده
۴۲	۱-۲-۲ خواص نوری مواد
۴۷	۲-۲-۲ سازوکار جذب نور لیزر در ماده

۴۹	۳-۲-۲ جنبه‌های فیزیکی در تابش لیزر به ماده
۵۷	۳-۲ موارد عملی از تابش لیزر بر ماده
۶۱	۴-۲ تأثیر قطبش بر جذب لیزر در ماده
۶۳	۵-۲ تأثیر زبانه یا پلاسمای القاشده توسط لیزر بر انتشار، بازتاب و جذب لیزر
۶۷	۶-۲ اپتیک کانونی، اندازه‌گیری و پایش چگالی توان لیزر
۷۱	۷-۲ سیستم انتقال با فیبر
۷۵	فصل سوم: اصول و ویژگی‌های جوشکاری با لیزر
۷۵	۱-۳ اصول جوشکاری لیزری
۷۸	۲-۳ جوشکاری با لیزر CO _۲
۸۲	۳-۳ جوشکاری با لیزر یاق (YAG)
۸۶	۴-۳ جوشکاری و لحیم‌کاری با لیزر دیسکی
۸۸	۵-۳ جوشکاری و لحیم‌کاری با لیزر فیبری
۹۲	۶-۳ جوشکاری، لحیم‌کاری با لیزرهای دیودی
۹۵	۷-۳ جوشکاری و لحیم‌کاری با لیزرهای سبز و آبی
۹۷	۸-۳ جوشکاری با لیزرهای پیکوثانیه و فمتوثانیه‌ای
۹۹	فصل چهارم: نتایج جوشکاری لیزری و پدیده‌ها
۹۹	۱-۴ جوشکاری نقطه‌ای با لیزر پالسی
۹۹	۱-۱-۴ پدیده‌ها حین جوشکاری نقطه‌ای با لیزر
۱۰۴	۲-۱-۴ تأثیر شرایط جوشکاری لیزری بر نفوذ و عیوب جوش
۱۰۷	۳-۱-۴ اثر شکل‌دهی پالس لیزری بر نفوذ و عیوب جوش
۱۱۱	۲-۴ جوشکاری دانه تسبیحی با موج پیوسته لیزر (CW)
۱۱۱	۱-۲-۴ اثر پارامترهای جوشکاری لیزری بر نفوذ جوش و شکل‌گیری عیوب
۱۱۴	۲-۲-۴ رفتار زبانه و پدیده‌های فیزیکی حین جوشکاری لیزری موج پیوسته (CW)
۱۲۰	۳-۲-۴ شارش مذاب و پاشش در حین جوشکاری لیزری
۱۲۶	۳-۴ مدل‌سازی و شبیه‌سازی جوشکاری لیزری
۱۲۶	۱-۳-۴ خصوصیات زبانه و پلاσμα
۱۲۸	۱-۳-۴ افزایش دمای ماده
۱۲۹	۳-۳-۴ شبیه‌سازی در حین جوشکاری لیزری
۱۳۱	فصل پنجم: سازوکار شکل‌گیری و رویه‌های پیشگیرانه عیوب جوشکاری لیزری
۱۳۱	۱-۵ ویژگی‌های انواع عیوب جوشکاری
۱۳۴	۲-۵ سازوکار شکل‌گیری و رویه‌های پیشگیری از تخلخل
۱۴۸	۳-۵ سازوکار شکل‌گیری و رویه‌های پیشگیری از ترک داغ (انجماد)
۱۵۲	۴-۵ سازوکار شکل‌گیری و رویه‌های پیشگیری از پاشش منجر به کم‌پرسندگی
۱۵۴	۵-۵ سازوکار شکل‌گیری و رویه‌های پیشگیری از برآمدگی و سوختگی کنار جوش
۱۵۷	۶-۵ نمایه‌سختی و خواص مکانیکی اتصالات جوش داده‌شده با لیزر

۱۶۱	فصل ششم: رایندهای ویژه در انواع جوشکاری لیزری
۱۶۱	۱-۶ جوشکاری ورقه‌های دوخت‌شده
۱۶۳	۲-۶ جوشکاری لیزری از دور (رویش باریکه)
۱۶۵	۳-۶ لحیم‌کاری لیزری (سخت)
۱۶۸	۴-۶ لحیم‌کاری لیزری (نرم)
۱۷۰	۵-۶ جوشکاری لیزر با پرتوهای چندلیزری
۱۷۴	۶-۶ جوشکاری لیزری توسط پرتو لیزر با مُد تغییر یافته
۱۷۶	۷-۶ جوشکاری ترکیبی لیزر- قوس
۱۸۵	فصل هفتم: پایش فرایند، سنجش و کنترل تطبیقی در حین جوشکاری لیزری
۱۸۵	۱-۷ فناوری پایش فرایند
۱۸۶	۲-۷ سنجش یا ردیابی درز در حین جوشکاری لیزری
۱۸۸	۳-۷ برش‌نگاری همدوس نوری و کاربرد آن در اندازه‌گیری عمق سوراخ
۱۹۲	۴-۷ پایش حین فرایند و کنترل تطبیقی در حین جوشکاری لیزری پالسی یا موج پیوسته
۱۹۷	فصل هشتم: ویژگی‌های جوشکاری لیزری مواد متفاوت
۱۹۷	۱-۸ جوشکاری لیزری فولاد یا فولاد ضدزنگ
۲۰۴	۲-۸ جوشکاری لیزری آلیاژهای آلومینیوم
۲۰۹	۳-۸ جوشکاری لیزری مس
۲۱۱	۴-۸ جوشکاری لیزری آلیاژهای منیزیم، تیتانیوم و سوپر آلیاژهای مبتنی بر نیکل
۲۱۷	۵-۸ جوشکاری لیزری یا لحیم‌کاری سخت سرامیک
۲۱۷	۶-۸ اتصال لیزری پلاستیک‌ها
۲۲۱	۷-۸ جوشکاری یا اتصال شیشه با لیزر
۲۲۳	فصل نهم: وشرکاری، اتصال و لحیم‌کاری لیزری مواد غیرمشابه
۲۲۳	۱-۹ جوش فولاد و آهن ریخته‌گری با لیزر
۲۲۵	۲-۹ جوش فولاد و آلیاژ آلومینیوم با لیزر
۲۲۹	۳-۹ جوش فولاد و مس با لیزر
۲۳۱	۴-۹ جوش فولاد و آلیاژ منیزیم با لیزر
۲۳۴	۵-۹ جوش مس و آلیاژ آلومینیوم با لیزر
۲۳۵	۶-۹ جوش تیتانیوم و آلیاژ آلومینیوم با لیزر
۲۳۷	۷-۹ اتصال فلز به پلاستیک یا CFRP با لیزر
۲۴۱	۸-۹ اتصال یا لحیم‌کاری فلز به سرامیک با لیزر
۲۴۳	فصل دهم: کاربردهای صنعتی جوشکاری لیزری یا ترکیبی
۲۴۳	۱-۱۰ صنایع استیل
۲۴۵	۲-۱۰ صنایع خودرو
۲۴۷	۳-۱۰ کاربرد در قطار و هواپیما

۲۵۰	۱۰-۴ کاربرد در ساخت کشتی و پل
۲۵۳	۱۰-۵ صنایع الکتریکی و الکترونیکی
۲۵۴	۱۰-۶ صنایع جواهرسازی، قاب عینک و پزشکی
۲۵۷	واژگان فارسی به انگلیسی
۲۶۰	واژگان انگلیسی به فارسی
۲۶۳	منابع

پیشگفتار

کلمه «لیزر» که توسط آقای گوردون گولد^۱ در ایالات متحده آمریکا نام‌گذاری شده است، مخفف «تقویت نور توسط انتشار تحریک شده تشعشع»^۲ است. لیزر یک نور مصنوعی از دسته امواج الکترومغناطیسی است. پرتو لیزر را می‌توان از طریق عدسی یا آینه در نقطه کوچکی متمرکز کرد و در نتیجه تبدیل به یک چشمه حرارتی با چگالی بسیار بالا می‌شود. به راحتی می‌تواند هر فلز، سرامیک، پلاستیک و غیره را گرم، ذوب و/یا تبخیر کند. در نتیجه، لیزرها به‌طور مناسب در صنایع مختلف برای پردازش مواد مانند جوشکاری، لحیم کاری نرم، لحیم کاری سخت، سوراخکاری، برشکاری، علامت‌گذاری، تمیز کاری، روکش کاری، ساخت افزایشی یا چاپ سه‌بعدی و غیره استفاده می‌شود. به‌ویژه در این میان جوشکاری لیزر بیشترین توجه را در بین پردازش مواد لیزری به خود اختصاص داده است.

امروزه در زمینه جوشکاری با لیزر تحقیقات و پیشرفت زیادی در سراسر جهان در حال انجام است. تا حدود سال ۱۹۹۰، تحقیقات و پیشرفت‌های زیادی در لیزرهای پرتوان CO₂ به‌طور فعال در ایالات متحده آمریکا و سپس در ژاپن، آلمان، بریتانیا و فرانسه انجام شد. در قرن حاضر نیز، لیزرهای دیسکی، فیبری و دیودی با توان‌های بالا ساخته شد. آلمان به پیشرفته‌ترین کشور در فرآوری مواد با لیزر و پیشرو در جهان تبدیل شده است و کشورهای چین، آمریکا، انگلستان، ژاپن و فرانسه دنباله‌روی آن هستند.

با توجه به لزوم استفاده از تکنولوژی‌های نو در زمینه تولیدات صنعتی در کشورمان که توان رقابت با تولیدات کشورهای پیشرفته را داشته باشد و لزوم آموزش دانشجویان،

1. Gordon gould

2. Light amplification by stimulated emission of radiation

مهندسان و محققان با روش‌های کارآمد و با قابلیت‌های منحصربه‌فرد جوشکاری با لیزر، نویسنده را بر آن داشته است که به پشتوانه چندین سال پژوهش و تدریس در دانشگاه‌ها و حضور در صنایع، با شناخت نیازها اقدام به جمع‌آوری نتایج تحقیقات به روز انجام‌گرفته در دنیا نموده و با تدوین مطالب به‌نحوی که با پیوستگی، تفهیم و ساده‌سازی مطالب، خواننده را از مطالعه پراکنده مطالب از منابع مختلف بی‌نیاز سازد.

راهنمای مطالعه کتاب

در فصل اول به لیزرهای صنعتی که برای پردازش مواد مورد استفاده قرار گرفته و تاکنون رشد قابل توجهی یافته و عملاً برای اتصال و جوش استفاده می‌شوند، پرداخته شده است. لیزرهای پرتوان ابتدا در لیزر دی‌اکسید کربن (CO_2) و سپس در لیزر یاق (YAG) توسعه یافتند. پس از آن، لیزرهای اگزایمر رشد کردند، اما این لیزرها بیشتر در سوراخکاری مورد استفاده قرار گرفتند و نه در جوشکاری. سپس لیزرهای دیودی پرتوان گسترش یافتند و به دنبال آن، لیزرهای دیسکی و فیبری با توان، کیفیت و کارایی بالا توسعه یافته و به طور گسترده‌ای در جوشکاری و برشکاری استفاده شدند. در سال‌های اخیر، لیزرهای پالسی فوق کوتاه مانند لیزرهای پیکوثانیه و فمتوثانیه‌ای برای اتصال شیشه‌ها مورد استفاده قرار گرفته و همچنین لیزرهای هم‌هنگ دوم که نور سبز را از لیزرهای دیسکی تولید می‌کنند به همراه لیزرهای دیودی آبی به طور فعالی در جوشکاری ورق‌ها و صفحات مسی توسعه یافته‌اند.

در فصل دوم، مبانی برهم‌کنش لیزر با مواد مورد بررسی قرار می‌گیرد زیرا این مطالب باید در پردازش مواد لیزری، به ویژه جوشکاری به خوبی درک شوند. فصل سوم ویژگی‌های جوشکاری لیزری و نتایج مهم به دست آمده با لیزرهای کاربردی مختلف را شرح می‌دهد. فصل چهارم به پدیده‌های جوشکاری در حین جوشکاری نقطه‌ای با لیزر پالسی یاق و جوش تسبیحی (خطی) با لیزرهای موج پیوسته CO_2 ، یاق، دیسکی یا فیبری می‌پردازد. در فصل پنجم، سازوکارهای شکل‌گیری عیوب و روش‌های پیشگیرانه آن در جوشکاری لیزر مورد بحث قرار گرفته‌اند. فرایندهای جوشکاری مشخصه در

فصل ششم توضیح داده شده است. در فصل هفتم، پایش در حین و پس از فرایند، ردیابی درزها و کنترل تطبیقی در حین جوشکاری لیزری با جزئیات نوشته شده است. فصل هشتم، ویژگی‌های مختلف جوش لیزری را در مواد مختلف شرح می‌دهد. فصل نهم به نتایج جوشکاری لیزری و یا اتصال مواد غیرمشابه می‌پردازد. در آخر در فصل دهم ویژگی کاربردهای صنعتی جوش لیزری یا جوشکاری ترکیبی قوس- لیزر را تشریح می‌کند.

هدف کلی کتاب

در این کتاب نتایج به روزی از جوش لیزری، دانش و اطلاعات مهم در این زمینه خلاصه شده است. بنابراین، این کتاب می تواند به عنوان یک کتاب درسی مستقل با عنوان جوش لیزری و یا کتاب کمکی جامع در درس کاربرهای لیزر برای دانشجویان سال های آخر کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته های مرتبط مانند فیزیک، مهندسی مکانیک و مواد مورد استفاده قرار بگیرد. نویسنده امیدوار است که کتاب حاضر به همه خوانندگان آن اعم از دانشجویان، محققان، کارشناسان، اساتید، سازندگان و فروشندگان دستگاه های لیزر و دستگاه های جانبی کمک شایسته ای در شناخت قابلیت ها و به کارگیری این تکنولوژی جدید نماید.

فصل اول

انواع لیزرها و مشخصه‌های آن‌ها برای جوشکاری

۱-۱ اصول لیزر

کلمه «لیزر» مخفف «تقویت نور توسط گسیل تحریک‌شده تابش»^۱ است که فرایند فیزیکی تابش نور یا اصول گسیل را توصیف می‌کند. لیزر به صورت طبیعی در طبیعت وجود ندارد اما این نور به صورت مصنوعی از امواج الکترومغناطیسی ساخته می‌شود.

ویژگی‌های لیزر در جدول ۱-۱ خلاصه شده است. لیزرها دارای چندین ویژگی عالی مانند تک‌رنگی عالی یا محدوده طیف بسامدی بسیار باریک، جهت‌مندی یا موازی‌بودن فوق‌العاده، همدوسی مکانی و زمانی قوی، توانایی تمرکز بالا در یک نقطه کوچک، شدت یا چگالی توان زیاد، تمرکز سریع انرژی نورانی و غیره هستند. یک پرتو لیزر را می‌توان از طریق عدسی یا آینه به یک نقطه کوچک متمرکز کرد و در نتیجه تبدیل به یک منبع حرارتی با چگالی (شدت) بسیار بالا می‌شود. می‌توان از این روش فلزات، سرامیک، پلاستیک و غیره را گرم، ذوب و/یا تبخیر کرد و همچنین می‌توان با آن پردازش مواد سخت و/یا شکننده را که پردازش آن‌ها با سایر ابزارها دشوار است، تسهیل کرد.

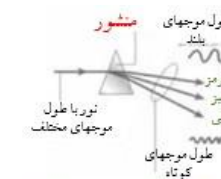
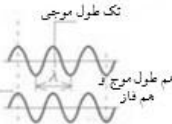
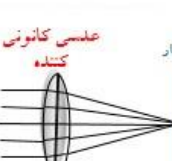
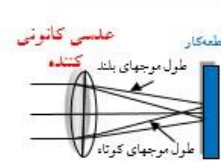
پرتو لیزر را می‌توان در خلأ یا در محیط‌های مختلف بدون تضعیف ارسال کرد و هرگونه مواد یا حتی سازه‌های بزرگ مقیاس را به صورت غیرتماسی از یک مکان دور پردازش نمود و در مواردی می‌تواند پلاستیک یا شیشه دورن مواد شفاف دیگر را پردازش کند. خصوصیات مغناطیس مواد در محصول پردازش تأثیری نمی‌گذارد، درحالی‌که که در پردازش از طریق پرتو الکترونی تأثیرگذار هستند. لیزرها با طول موج کوتاه با دارا بودن انرژی

1. Light amplification by stimulated emission of radiation

زیاد فوتون با تسهیل تجزیه یا یونیزاسیون اتم‌ها یا مولکول‌ها و واکنش شیمیایی مواد، امکان سوراخکاری را با واکنش فتوشیمیایی را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، پردازش فرسایشی که به معنای تبخیر غیرحرارتی در مواد است توسط لیزرهایی با طول موج کوتاه و دوام زمان پالس فوق کوتاه و چگالی توان قله بسیار بالا قابل اجرا است.

با بهره‌گیری از ویژگی‌های فوق، لیزرها در زمینه‌های مختلف صنعتی در پردازش مواد مانند جوشکاری، لحیم‌کاری سخت، لحیم‌کاری نرم، سوراخکاری، برش، علامت‌گذاری، تمیزکاری، روکش‌گذاری، فناوری ساخت افزایشی یا پرینت سه‌بعدی، سخت‌سازی تبدیل مارتنزیت در اثر سردایش و غیره استفاده می‌شوند (Joshi & Dixit, 2015). به‌ویژه جوشکاری لیزری بیشترین توجه را در بین پردازش‌های لیزری مواد در این میان به خود جلب کرده است.

جدول ۱-۱. نمایی از ویژگی‌های لیزرها

کاربرد	لیزر	نور طبیعی
- تحلیل طیفی - جداسازی ایزوتوپ‌ها		
- ارتباطات نوری - روبشگر لیزری - دیسک نوری - رادار لیزری		
- تمام نگاری - اندازه‌گیری با دقت بالا از روش نوارهای تداخلی		
- پردازش لیزری - چاقوی لیزری - سلاح لیزری		

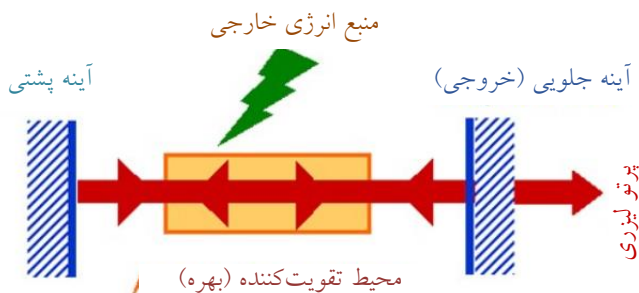
۱-۲ اصول تابش لیزر

یک سیستم لیزری عموماً از سه جزء اصلی زیر تشکیل شده‌اند که به صورت طرحواره در شکل ۱-۱ نشان داده شده است:

- یک محیط تقویت‌کننده یا بهره (که می‌تواند جامد، مایع یا گاز باشد). این محیط از اتم‌ها، مولکول‌ها، یون‌ها یا الکترون‌هایی تشکیل شده است که از تراز انرژی آن‌ها برای افزایش توان موج نور در حین انتشار درون آن استفاده می‌شود. پدیده اصلی فیزیکی منجر به لیزر را گسیل تحریکی نامند.

- سازوکاری برای برانگیزش حالت انرژی محیط بهره که اصطلاحاً سیستم دمش نیز نامیده می‌شود. این امر با تأمین انرژی لازم برای محیط، شرایط را برای تقویت نور فراهم می‌کند. انواع مختلفی از سیستم دمش عبارت‌اند از: دمش نوری (استفاده از خورشید، لامپ‌های فلاش، لامپ‌های قوس پیوسته یا لامپ‌های رشته تنگستن، دیود یا لیزرهای دیگر)، دمش الکتریکی (لوله‌های تخلیه گاز، جریان الکتریکی در نیمه هادی‌ها) یا حتی دمش شیمیایی.

- استفاده از یک مشدد نوری جهت تقویت بیشتر نور با رفت و بازگشت‌های متوالی از محیط بهره و همچنین ایجاد جهت‌مندی بیشتر و کاهش واگرایی نور لیزر با استفاده از دو آینه متقابل که به اصطلاح کاواک لیزری نامیده می‌شود.



شکل ۱-۱. طرحواره‌ای از یک نوسانگر لیزری

۱-۲-۱ انواع جذب و گسیل در محیط بهره

مفهوم ترازهای انرژی برای درک تابش لیزر بسیار اساسی است، زیرا که لیزر از طریق گذار بین ترازهای مختلف انرژی یک سیستم اتمی یا مولکولی صورت می‌گیرد.

(Saleh & Teich, 2019). برهم‌کنش نور (لیزر) با مواد مانند اتم‌ها، یون‌ها و مولکول‌ها با در نظر گرفتن سه فرایند مختلف: جذب، فلورسانس یا گسیل خودبه‌خودی و گسیل تحریکی قابل‌درک است که در شکل ۱-۲ به صورت طرحواره ارتباط بین فوتون نوری و حالت‌های اتمی یا ترازهای انرژی به نشان‌داده شده است.

- (الف) پدیده جذب^۱: این پدیده هنگامی اتفاق می‌افتد انرژی نور تابیده شده به ماده $E = h\nu$ که در آن ν بسامد نور و h ثابت پلانک است) با اختلاف انرژی تراز پایه نسبت به تراز برانگیخته $(\Delta E = E_2 - E_1)$ مطابقت داشته و از این طریق یک اتم در تراز انرژی پایین با جذب انرژی نوری به تراز بالاتر برانگیخته شود. آهنگ جذب (تعداد وقوع جذب در واحد زمان) با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dF}{dt} = -W_{12}N_1 \quad (1-1)$$

که در آن N_1 جمعیت (تعداد اتم‌ها در واحد حجم ماده) در تراز پایین و W_{12} احتمال گذار است که با رابطه زیر به شار فوتونی F (شدت نور فرودی) و سطح مقطع گذار σ_{12} مربوط می‌شود:

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (2-1)$$

با انجام هر جذب از تعداد فوتون‌ها و همچنین از تعداد اتم‌ها در تراز پایین کاسته شده ولی بر تعداد اتم‌ها در تراز بالا افزوده می‌شود.

- (ب) پدیده گسیل خودبه‌خودی^۲ یا فلئورسانس^۳: اتمی که در تراز انرژی بالا واقع شده است به‌طور خودبه‌خودی از طریق فرایندهای مختلفی به تراز انرژی پایین‌تر فروافت (واهلش) می‌یابد. غالب فروافت انرژی در اتم‌ها به صورت واهلش غیرنوری از طریق ترازهای ارتعاشی است که در آن انرژی اتم صرف ارتعاش اتم درون مولکول و یا چرخش آن می‌شود که در نهایت به صورت گرما تلف خواهد شد. اما گاهی اوقات این فروافت از طریق تابش فوتونی است که انرژی آن متناظر با اختلاف انرژی دو تراز بوده تا از این طریق اصل بقای انرژی را برآورده نماید. آهنگ وقوع این پدیده با رابطه زیر داده می‌شود

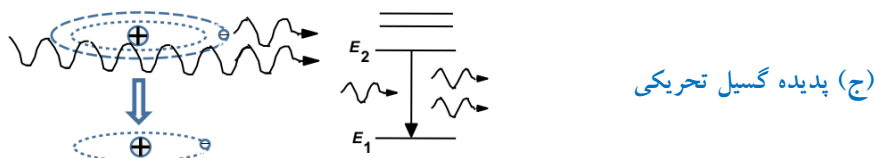
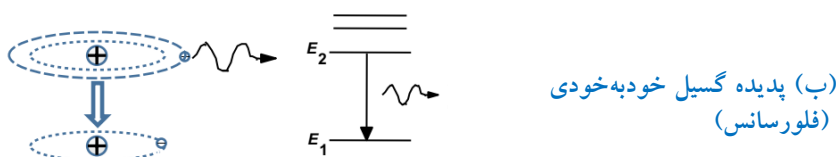
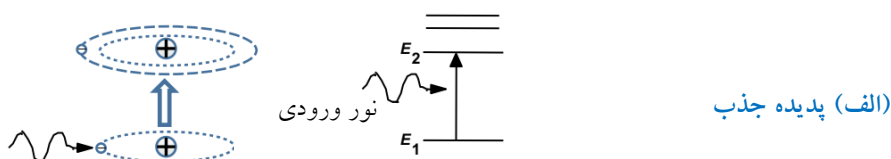
$$\frac{dN_2}{dt} = -AN_2 \quad (3-1)$$

که در آن A ، ضریب انشتین برای گسیل خودبه‌خودی است که رابطه عکس با طول عمر فوتون در تراز بالا دارد ($A \propto 1/\tau$). به عبارت دیگر به هر میزان که طول عمر ترازای بیشتر باشد (اتم مدت زیادی را در تراز بالا بماند)، مقدار ضریب A برای آن تراز کمتر بوده و اصطلاحاً آن تراز را شبه پایدار نامند و در محیط‌های مطلوب برای لیزرزیایی از این ترازها به عنوان تراز بالایی لیزری استفاده می‌شود.

- (ج) پدیده گسیل تحریکی^۱: اتمی که در تراز انرژی بالاتری واقع شده است با برهم‌کنش با نور ورودی در بسامدی متناظر با اختلاف انرژی بین دو تراز، وضعیت اتم به سطح انرژی پایین‌تر فروافت کرده و یک فوتون نوری گسیل می‌شود. آهنگ وقوع این پدیده با رابطه زیر بیان می‌شود که بسیار مشابه پدیده جذب است:

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dF}{dt} = -W_{21}N_2 \quad (۱-۴)$$

دو فوتون پدیدآمده درحین فرایند گسیل تحریکی از هر لحاظ مشابه به هم بوده و دارای بسامد، جهت حرکت و فاز یکسانی هستند. بدین ترتیب شدت نور تقویت می‌شود که این فرایند منشأ ایجاد لیزرها است.



شکل ۱-۲. تصویر طرحواره جذب، گسیل خودبه‌خود (فلورسانس) و گسیل تحریکی

این سه سازوکار به طور هم زمان در ایجاد یک گذار تابشی حضور دارند. برای ایجاد یک محیط مستعد لیزرزا، باید شرایطی را ایجاد شود که گسیل تحریکی، نسبت به جذب و گسیل خودبه خودی ارجحیت داشته باشد. بنابراین، باید هم محیط مناسب و هم شرایط مناسبی برای ایجاد پدیده لیزر انتخاب شوند. فوتون فرودی با انرژی $h\nu$ شانس یکسانی برای جذب شدن توسط یک اتم در حالت پایه دارد و اینکه در اثر برهم کنش با یک اتم در حالت برانگیخته تکثیر (یا تقویت) شود. جذب و گسیل تحریکی در واقع دو فرایند متقابل هستند که احتمال یکسانی دارند ($W_{12} = W_{21}$) و هر دو هم زمان در سیستم به وقوع می پیوندند. بر طبق روابط (۱-۱) و (۱-۲) افزایش و یا کاهش در شار فوتونی موجود در محیط از طریق رابطه زیر خواهند بود:

$$dF = \sigma F(N_2 - N_1)dV \quad (5-1)$$

برای افزایش احتمال گسیل تحریکی نسبت جذب، لازم است تا اتم های حالت برانگیخته بیشتری در مقایسه با اتم های حالت پایه وجود داشته باشد ($N_2 > N_1$). گسیل خودبه خودی به طور طبیعی تمایل به تخلیه تراز بالایی دارد، بنابراین این تراز بایستی از طریق گسیل تحریکی سریع تر تخلیه شود. ثابت شده است که اگر محیط مورد مطالعه پر از نور باشد (یعنی تعداد زیادی فوتون در محیط باشد) احتمال گسیل تحریکی بسیار بیشتر از خودبه خودی است. راهکار عملی مناسب برای ایجاد چنین شرایطی، محصور کردن فوتون ها در یک کاواک نوری است.

۱-۲-۲ فرایند دمش و ایجاد وارونی جمعیت

گفته شد که به منظور افزایش احتمال گسیل تحریکی نسبت جذب، لازم است تا اتم های بیشتری در حالت برانگیخته (N_2) نسبت به اتم های حالت پایه (N_1) وجود داشته باشد، که در شرایط تعادل ترمودینامیکی غیرممکن است. توزیع اتم ها در بین ترازها توسط قانون بولتزمن^۱ به صورت زیر داده می شود:

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (6-1)$$

مطابق با این قانون همواره شرایط $N_2 < N_1$ برقرار خواهد بود و عملاً هرگز برتری گسیل تحریکی بر جذب وجود نخواهد داشت. برای برهم زدن شرایط تعادل

ترمودینامیکی لازم است با تزریق انرژی به سیستم که به اصطلاحاً دمش یا پمپاژ گفته می‌شود، بقدر کافی بر جمعیت تراز بالا افزوده‌شده و به اصطلاح شرایط وارونی جمعیت^۱ ایجاد گردد. عمل دمش از طریق فرایندهای نوری، الکتریکی، برخورد الکترونی، دینامیک جریان بالایی گازی، شیمیایی، الکترومغناطیسی و حتی هسته‌ای در لیزرهای مختلف به کار گرفته شده‌اند. غالب لیزرهای مورد استفاده در بحث پردازش مواد جامد و فلزات که در ادامه این کتاب به آن پرداخته خواهد شد، از دو روش نوری و الکتریکی جهت دمش استفاده می‌شود که در زیر به آن‌ها پرداخته خواهد شد.

در روش نوری از نور حاصل از یک چشمه نورانی قوی مانند لامپ‌های پرفشار زنون یا کریپتون برای دمش سیستم لیزرهای حالت جامد و مایع استفاده می‌شود. محیط فعال در یک دستگاه لیزر با جذب نور لامپ دمش، تراز انرژی آن از حالت پایه به حالت‌های با انرژی بالاتر ارتقا می‌یابد. این محیط فعال در لیزرهای موج پیوسته به‌طور مداوم تحت تابش نور هستند، درحالی‌که در لیزرهای پالسی از لامپ‌های فلاش که نور را در یک زمان کوتاه صانع می‌کنند برای دمش استفاده می‌شود. در روش دمش نوری کارایی‌های انتقال نوری، تابش لامپ و کارایی کوانتومی در بازده فرایند دمش بایستی مدنظر قرار بگیرند. کارایی انتقال (η_T) برابر است با نسبت نور رسیده به محیط فعال به انرژی نورانی تولیدی توسط لامپ است. کارایی تابندگی لامپ (η_R) نیز نسبت تبدیل انرژی نورانی تولیدشده توسط لامپ به انرژی الکتریکی تحویل‌شده به آن است. کارایی کوانتومی (η_Q) مرتبط با مقدار انرژی فرریخته به تراز انرژی مطلوب در اتم که به‌درستی سبب وارونی جمعیت آن شود، به کل انرژی تحویل‌شده به اتم است، زیرا ممکن است فرایند برانگیزش به ترازهای دیگری و یا به تراز پایه ختم شود که تأثیری در تولید نور لیزر نداشته باشد. بازده کل دمش (η_P) از حاصلضرب این کارایی‌ها به‌دست می‌آید:

$$\eta_P = \eta_T \eta_R \eta_Q \quad (V-1)$$

به‌عنوان مثال در لیزر حالت جامد یا قوت‌آلاییده به یون‌های کروم مقدار کارایی دمش در حدود ۱/۱٪ است و به‌خاطر کوچک بودن آن، امروزه از این لیزر استفاده چندانی در صنایع نمی‌گردد.