سال ۲۸، شماره ۱۲۷، صفحات ۶۱ ـ ۷۱، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

اساس لیزر و کاربرد آن در صنعت روز

سیده فاطمه نبوی[۱]، انوشیروان فرشیدیان‌فر[۲ و *]، محمدحسین فرشیدیان‌فر[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

[۲] استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

[۳] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

*مسئول مکاتبات: farshid@um.ac.ir

◄ چکیده

به جرأت می‌توان عصر حاضر را عصر تکنولوژی و پیشرفت نامید. یکی از قدرتمندترین و پیشرفته‌ترین حوزه‌های تکنولوژی مربوط به لیزر است. لیزر که تاریخچه آن به اواسط قرن بیستم باز می‌گردد، دستگاهی است که در آن نور در طی واکنش فیزیکی وارونگی جمعیت سه ویژگی مونوکروماتیک، جهت‌مندی و همدوسی به خود می‌گیرد. در این شرایط چگالی انرژی نور افزایش می‌یابد و در نتیجه از آن می‌توان در فرایندهای مختلف استفاده کرد. با توجه به اهمیت لیزر، در گزارش حاضر سعی شد نخست تاریخچه پیدایش لیزر ارائه شود. سپس، هریک از چهار ویژگی مذکور لیزر به دقت ذکر شود. بیان خواهد شد که لیزر از سه جزء دمنده (منبع انرژی خارجی)، محیط فعال و محفظه (رزوناتور اپتیکی) تشکیل شده است که جزئیات هریک نیز به دقت معرفی می‌شود. در ادامه، بیان خواهد شد که امواج خروجی از لیزر می‌تواند به دو صورت پیوسته یا گسسته باشند. برای درک بهتر نیز انواع لیزر متناسب با طول‌موج و نوع محیط فعال معرفی خواهد شد. سپس کاربردهای مختلف لیزر در صنعت شامل فرایندهای نشانه‌گذاری، برش، جوش، تمیزکاری، تولید افزایشی، سخت‌کاری و پوشش‌دهی ارائه می‌شود و در هر مورد نوع لیزر مورد استفاده نیز معرفی می‌شود.

◄ واژگان کلیدی

لیزر
جوش
تولید افزایشی
سخت‌کاری
پوشش‌دهی

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۲۴
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

۱ مقدمه

در محیط اطراف انرژی به شکل‌های مختلفی چهره خود را نشان می‌دهد. تمامی این منابع در فیزیک خود یعنی موج جامعیت دارند. یکی از این امواج حامل انرژی امواج نور است. با هوش و درایت، بشر توانسته است در قالب لیزر[۱]، در راستای جذاب و چشمگیری از این امواج استفاده کند. به عبارت دیگر، امواج پرانرژی نور به صورت کنترل‌شده در راستای مفید توسط لیزر استفاده می‌شوند.

از دیدگاهی دیگر، می‌توان این‌گونه بیان کرد که به طرز شگفت‌انگیزی، تصورات و خیالات بشر با اختراع لیزر به حقیقت پیوست. ولز[۲] نویسنده انگلیسی در کتاب مشهور علمی تخیلی خود با نام «جنگ دنیاها » در سال ۱۸۹۸ مرگ با استفاده از اشعه را تصویرسازی کرد [۱]. اسلحه‌های اشعه نوری در کتاب‌های کمیک سال ۱۹۵۰ به وفور دیده می‌شد که امروزه لیزرهای پرقدرت دقیقاً همین کار را کرده و به تخیلات جامه عمل پوشانیده است [۲].

کاربرد لیزر به حدی گسترده است که کمتر کسی یافت می‌شود که این لغت به گوشش آشنا نباشد. لیزر در شاخه‌ها و علوم مختلفی کاربرد دارد. در پزشکی به منظور تشخیص و درمان بیماری‌های چشم، گوش، حلق، بینی و حتی سلول‌های سرطانی از لیزر استفاده می‌شود. «چاقوی بدون‌خون‌ریزی[۳]» نمونه بارز استفاده از لیزر در جراحی است که دنیای پزشکی و درمان را به طریقی دگرگون کرده است. با استفاده از این وسیله، جراحان می‌توانند با ضایعات و ناراحتی‌های کمتر در بیمار، انواع مختلفی از جراحی‌های در هر قسمتی از بدن را انجام دهند [۳].

لیزر در وسایل ارتباطات و مخابراتی نیز کاربرد گسترده دارد. فیبر نوری تلفن[۴] و هولوگرام[۵] دو نمونه از استفاده لیزر در وسایل ارتباطی است. در پژوهش‌ها و تحقیقات علمی نیز چهره لیزر با روش‌های اسپکتروسکوپی یا طیف‌سنجی[۶]، متالورژی، خنک‌کاری لیزر، لیدار[۷] یا سنجش از راه دور دیده می‌شود. پرینترها، اسکنر بارکد و پوینتر سه کاربرد شناخته شده لیزر در محصولات تجاری است [۲]. با تمامی این مثال‌ها، گستردگی کاربرد لیزر در هیچ حوزه‌ای به اندازه صنعت چشمگیر و سریع نیست. در بروز این امر علل مختلفی دخیل هستند که در مطالعه حاضر به تفصیل تمامی موارد ذکر و برشمرده خواهند شد.

دقت شود که با توجه به گستردگی چشمگیر لیزر، این تکنولوژی در شکل‌ها، ابعاد، قیمت‌های متفاوت و تحت نام‌های مختلفی نظیر لیزر یاقوت[۸]، فایبر[۹]، هلیوم‌ـ‌نئون[۱۰]، آرگون[۱۱] و نیمه‌رسانا[۱۲] ظاهر می‌شود [۴]. با وجود این شهرت و کاربرد، تعداد محدودی به واقع می‌دانند که لیزر دقیقاً چیست و چگونه عمل می‌کند.

[1]laser [2]Wells [3]bloodless scalpel [4]fiber optic [5]hologram [6]spectroscopy [7]Lidar [8]ruby laser [9]fiber laser [10]helium-neon laser [11]argon laser [12]semiconductor laser

در این راستا، در پژوهش حاضر، هدف معرفی و ارائه ساختار لیزر به بیان ساده است. برای درک بهتر، در قسمت بعد ابتدا تاریخچه کلی لیزر و قوانین فیزیک حاکم بر آن ارائه خواهد شد. سپس در قسمت سوم، ویژگی‌ها و برجستگی‌های لیزر در مقایسه با نور ساده لامپ بیان می‌شود. بخش چهارم به اجزای سازنده لیزر می‌پردازد. در بخش پنجم انواع پرتوی خروجی از لیزر ارائه می‌شود. متناسب با اجزای سازنده، لیزرهای متفاوتی ساخته شده است که در بخش ششم ارائه می‌شوند. همچنین، با توجه به گستردگی حضور لیزر در صنعت، در بخش هفتم به کاربردهای لیزر در حوزه پردازش مواد در صنعت ساخت و تولید پرداخته خواهد شد. در نهایت، در قسمت هشتم نتیجه‌گیری مطالب ارائه‌شده بیان می‌شود.

۲ تاریخچه کلی لیزر

برخی شروع کار تئوری لیزر را به زمان ارائه معادله ماکسول[۱۳] توسط جیمز کلرک ماکسول در سال ۱۸۶۵ می‌دانند [۵]. وی دستگاه معادلاتی برای توصیف طبیعت موج نور ارائه کرد و معتقد بود که موج‌های الکترومغناطیسی دقیقاً با سرعت نور حرکت می‌کنند. دقت شود که ماکسول معتقد بود رفتار نور موجی‌شکل است. این در حالیست که بعدها دانشمندان مشاهده کردند که نور گاهی به صورت ذره و گاهی به صورت موج رفتار می‌کند [۳].

برخی مواد می‌توانند انرژی تابشی را جذب و آن را به صورت نور گسیل کنند. این شرایط زمانی است که الکترون پایدار یک اتم مقداری انرژی تابشی جذب کرده و به تراز برانگیخته برود. الکترون برانگیخته که تمایل به رسیدن به حالت پایدار دارد، در زمان بازگشت مقداری از خود انرژی آزاد می‌کند که به صورت نور گسیل می‌شود. اینشتین[۱۴] در مطالعات خود در سال‌های ۱۹۰۵ تا ۱۹۱۶ واحد اصلی نور گسیل‌شده در حین گسیل را «فوتون[۱۵]» نامید. هدف وی از این نامگذاری آن بود که بسته‌های تجزیه‌ناپذیر نور، «کوانتوم[۱۶]»، مثل ذرات متحرک رفتار می‌کنند. وی معتقد بود که فوتون می‌تواند به طور کامل جذب یک الکترون شود. همچنین، در دیدگاهی فراتر وی تاکید داشت که فوتون گسیلی از اتم می‌تواند اتم برانگیخته مشابه دیگری به وجود آورد تا فوتون دومی گسیل شود. این شکل از گسیل را وی، «گسیل القایی[۱۷]» نامید [۳]. با این توضیح، برخی مطالعات ریاضی اینشتین را آغازگر تئوری لیزر می‌نامند [۶].

این در حالیست که واقعیت عملی لیزر تا سال ۱۹۵۱ مسکوت باقی ماند. در این سال تاونز[۱۸] و گوردون[۱۹] در دانشگاه کلمبیا که در جستجوی راهی برای بیشتر کردن گستره فرکانس‌های میکروموج‌ها بودند یادی از نظریه اینشتین کردند. هدف آن‌ها افزایش فرکانس میکروموج به منظور استفاده در ارتباطات نیروی دریایی امریکا بود. وی محفظه‌ای شامل گاز گرمی را در نظر گرفت، برخی از اتم‌های آن در حالت برانگیخته و برخی در حالت پایدار قرار داشتند. مولکول‌های درون محفظه را می‌توان به شکلی درآورد که تعداد مولکول‌های برانگیخته دارای انرژی زیاد بتوانند به تشدید اپتیکی[۲۰] برسند. در این شرایط می‌شد مولکول‌های برانگیخته را توسط سیگنالی با فرکانس مشخص چنان برانگیخت که میکروموج گسیل کند. اگر دیواره‌های محفظه موردنظر یا رزوناتور اپتیکی[۲۱] به خوبی بازتابنده باشند، اتم‌های برانگیخته می‌توانند اتم‌های دیگری را تحریک و در نتیجه زنجیره بیشتری از میکروموج گسیل شود. در سال ۱۹۵۳، این پیشنهاد با استفاده از مولکول‌های گاز آمونیاک به عنوان محیط فعال[۲۲] درون رزوناتور اتفاق افتاد و آن را «میزر[۲۳]» نامیدند. این واژه مخفف «تقویت میکروموج با گسیل القایی» است [۳].

پس از کشف میزر، در سال ۱۹۵۸ تاونز و شاولو[۲۴] میزری ساختند که میکروموج با طول‌موج‌های کوچک‌تری تولید می‌کرد که در نهایت منجر به گسیل نور مرئی به جای میکروموج بود. آن‌ها این دستگاه را «لیزر» به معنای «تقویت نور با گسیل القایی[۲۵]» نامیدند [۳، ۷].

مطالب بیان‌شده خلاصه‌ای از تحقیقات برجسته در حوزه تاریخچه لیزر بود. این تحقیقات که تا سالیان سال ادامه پیدا کرد بسیار گسترده است. محققان و دانشمندان بسیاری به ساخت و بهره‌گیری از سایر مواد به عنوان محیط فعال لیزر پرداختند. با توجه به این گستردگی، در جدول‌های ۱ و ۲ به طور خلاصه تاریخچه آن ارائه شده است.

جدول ۱: سیر تاریخی پیدایش لیزر

سال	نوآوری	پدیدآورنده	مرجع
۱۸۶۵	معرفی معادله ماکسول	ماکسول	[۵]
۱۸۸۸	تولید و ردیابی امواج الکترومغناطیس	هرتز (Hertz)	[۵]
۱۹۰۰	کوانتیزاسیون تابش در یک حفره	پلانک (Plannck)	[۵]
۱۹۰۵	کوانتیزاسیون تابش	اینشتین	[۵]
۱۹۰۵	کوانتیزاسیون حالت‌های انرژی اتم	بور (Bohr)	[۵]
۱۹۱۶	تئوری انتشار نور	اینشتین	[۶]
۱۹۱۷	مفهوم گسیل القایی	اینشتین	[۶]
۱۹۲۳	تاثیر گسیل بر شاخص شکست[۲۶] گازهای اتمی حاوی اتم‌های تقویت‌شده (تئوری)	کرامرز (Kramers)	[۵]
۱۹۲۸	مشاهده تاثیر انتشار بر شاخص شکست اتم‌های گاز نئون تحریک‌شده	لادرنبورگ (Ladenburg)	[۸]
۱۹۴۰	پیشنهاد احتمال وارونگی جمعیت[۲۷]	فابریکانت (Fabrikant)	[۶]
۱۹۴۷	انتشار القایی در هیدروژن؛ اولین اثبات انتشارتحریک‌شده	لمب (Lamb) و رترفورد (Retherford)	[۹]
۱۹۵۱	ارائه ایده میز	تاونز	[۵، ۶]
۱۹۵۱	اختراع و ساخت میزر	وبر (Weber) پروخوروف، بسو	[۶]
۱۹۵۴	اختراع بمب اپتیکی بر مبنای وارونگی جمعیت پالسی	دیک	[۱۰]
۱۹۵۶	ارائه پیشنهاد میزر جامد سه سطحی	بلومبرگن (Blömbergen)	[۱۱]
۱۹۵۷	اولین سند تحقیق بر لیزر	گولد (Gould)	[۶]
۱۹۵۸	ارائه پیشنهاد میزر فروسرخ و اپتیکی	شاولو و تاونز	[۷]
۱۹۵۹	ارائه پیشنهاد لیزرهای نیمه‌هادی	باسو (Basov)	[۵]
۱۹۶۰	ثبت اختراع لیزر	شاولو، تاونز	[۱۲]
۱۹۶۰	لیزر یاقوت	میمن	[۱۳]

[13]Maxwell [14]Einstein [15]photon [16]quantum [17]stimulated emission [18]Tawnes [19]Gordon [20]optical resonance [21]optical resonator [22]active medium [23]MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) [24]Schawlow [25]Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation [26]refractive index [27]population inversion

جدول ۲: ادامه جدول ۱

سال	نوآوری	پدیدآورنده	مرجع
۱۹۶۰	لیزر اورانیوم[28]	سوروکین (Sorokin) و استیونسون (Stevenson)	[۱۴]
۱۹۶۰	اختراع لیزر هلیوم–نئون	جوان، بنت (Bennett) و هریوت (Herriott)	[۱۵]
۱۹۶۲	اختراع لیزر نیمه‌هادی	هال (Hall)	[۱۶]
۱۹۶۴	اختراع اولین لیزر اندی‌یاگ[29] قابل استفاده	ژئوسیک (Geusic) و همکاران	[۱۷]
۱۹۶۴	اختراع لیزر کربن دی‌اکسید	پتل (Patel)	[۱۸]
۱۹۶۴	اختراع لیزر یون آرگون[30]	بریدجز (Bridges)	[۱۹]
۱۹۶۵	اولین لیزر شیمیایی	پیمنتل (Pimentel) و کسپر (Kasper)	[۲۰]
۱۹۶۶	اولین لیزر بخار فلز[31]	سیلوست (Silvast) و همکاران	[۲۱]
۱۹۷۷	لیزر الکترون آزاد[32]	میدی (Madey) و همکاران	[۵]
۱۹۷۹	لیزر آلکسندریتا[33]، اولین لیزر جامد قابل تنظیم[34]	والینگ (Walling)	[۵]
۱۹۸۲	لیزر تیتانیوم–سافیر[35]	مولتون (Moulton)	[۵]
۱۹۹۱	لیزر دیود سبز[36]	هیس (Hasse) و همکاران	[۵]
۱۹۹۴	لیزر آبشار کوانتومی[37]	کپسو (Capasso) و همکاران	[۵]
۱۹۹۷	لیزر دیود آبی[38]	ناکامورا (Nakamura)	[۵]

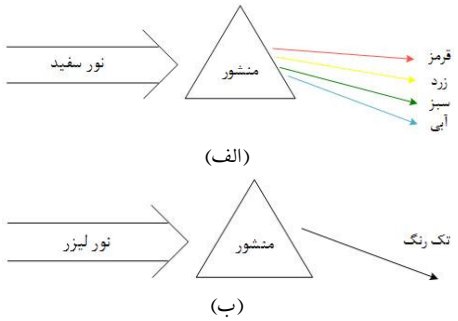
لازم به ذکر است که مطالعات و پژوهش‌های مربوط به لیزر به سال ۱۹۹۷ ختم نمی‌شود. پس از این سال، تحقیقات لیزر در حوزه‌های مختلفی گسترش یافت. به عنوان مثال، تاریخچه لیزر در پوست در مطالعه [۲۲] و تاریخچه آن در دندان‌پزشکی در پژوهش [۲۳] بررسی شده است. پژوهش‌های مربوط به اسکنرهای لیزر در مطالعه‌ای جمع‌آوری شد [۲۴]. مروری بر تکنولوژی لیزر پالسی اندی‌یاگ مورد استفاده در دریل در پژوهشی دیگر مطالعه شد [۲۵]. پیشرفت‌های مربوط به لیزرهای فایبر در مطالعه‌ای بررسی و ارائه شد [۲۶]. با توجه به حجم کثیر مطالعات انجام‌شده در حوزه لیزر، به منظور درک اهمیت آن، ویژگی‌های آن در ادامه ارائه خواهد شد.

۳ ویژگی‌های لیزر

لیزر ابزاری است که موج نور را به صورت پرتوهای موازی بسیار باریکی که طول‌موج مشخصی دارند، ساطع می‌کند. شاید این سؤال پیش بیاید که چه تفاوتی بین نور ساطع‌شده از لیزر و لامپ وجود دارد. در ادامه برخی از تفاوت‌ها که ویژگی‌های لیزر نیز به حساب می‌آید، ارائه خواهد شد:

۱.۳ مونوکروماتیک[39]

در حالیکه نور ساطع از لامپ شامل چندین طول موج (نور سفید) است، نور ناشی از لیزر تنها یک طول موج مشخص دارد. این خاصیت لیزر در فیزیک، «مونوکروماتیک» یا «تک‌رنگی» نامیده می‌شود [۳، ۲۷]. برای درک این ویژگی به شکل ۱ توجه کنید.



شکل ۱: امواج نور؛ الف) سفید و ب) قرمز لیزر در مقابل منشور [۲۷]

۲.۳ جهت‌مندی[40]

تفاوت دیگر در نور لیزر و لامپ جهت تابش آن‌ها است. لامپ نور را در همه جهات ساطع می‌کند، حال آنکه در لیزر نور در یک جهت مشخص تابیده می‌شود. بنابراین نور لیزر «جهت‌مند» و موازی است [۵].

۳.۳ همدوسی[41]

ویژگی دیگر نور ساطع‌شده از لیزر، «همدوسی» آن است که به سبب آن، هدر رفت انرژی پرتوی ناشی از لیزر کمتر از پرتوی ناشی از لامپ است [۲۸]. منظور از همدوسی آن است که امواج لیزر در فرکانس و فاز برابر حرکت‌کرده و در نتیجه بین امواج آن اختلاف فاز وجود ندارد. بدین‌ترتیب باریکه آن بسیار پرقدرت خواهد بود [۳].

۴.۳ شدت بالای انرژی

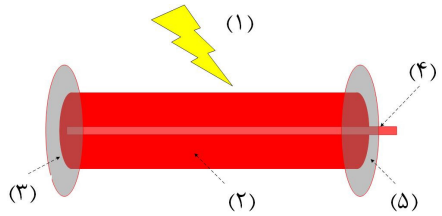
یکی دیگر از ویژگی‌های لیزر، شدت بالای انرژی در نقطه تمرکز[42] است. با توجه به سه خصوصیت قبلی که معرف آن است که امواج لیزر به صورت هم‌فرکانس، در یک خط راست و بدون اختلاف فازی نسبت به یکدیگر در حرکت هستند، می‌توان انتظار داشت که مقدار انرژی در نقطه تمرکز زیاد باشد. در گزارشی، میزان شدت انرژی در این نقطه، بیشتر از 10^{15} وات بر سانتی‌متر مربع گزارش شده است [۲۸]. با توجه به ویژگی‌های مذکور، در ادامه اجزای اصلی لیزر ارائه خواهد شد.

۴ لیزر و اجزای آن

لیزر شامل سه قسمت اصلی است که عبارتند از الف) محیط فعال، ب) منبع انرژی خارجی یا دمنده[43] و ج) محفظه یا رزوناتور اپتیکی [۴، ۶]. برای درک

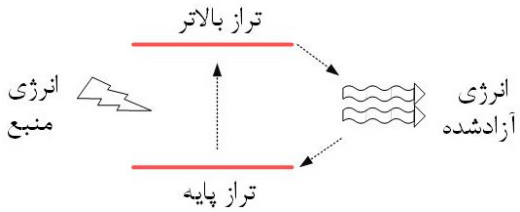
[28] uranium laser [29] the Yttrium-Aluminium-Garnet Nd:YAG [30] the argon ion laser [31] metal vapor laser [32] free-electron laser [33] Alexandrite laser [34] tunable solid state laser [35] titanium-sapphire laser [36] green diode laser [37] quantum cascade laser [38] blue diode laser [39] monochromatic [40] directionality [41] coherence [42] focal spot [43] pumping source

بهتر، نمای شماتیک لیزر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمای شماتیک لیزر

عمل لیزر در چند مرحله انجام می‌گیرد. مطابق شماره (۱) شکل ۲، منبع انرژی یا پمپ به محیط فعال انرژی را به صورت نور گسیل می‌کند. محیط فعال (شماره (۲) در شکل ۲)، این نور را جذب می‌کند. با این جذب، برخی از الکترون‌های محیط فعال برانگیخته‌شده و به تراز انرژی بالاتری می‌روند. الکترون که تمایل به بازگشت دارد، از خود انرژی آزاد می‌کند که نمای شماتیک آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود. انرژی آزادشده یا درخش‌های مکرر نور ناشی از منبع انرژی ادامه پیدا می‌کند. هنگامی که تعداد اتم‌های برانگیخته محیط فعال بیشتر از اتم‌های پایدار شود، «وارونگی جمعیت» اتفاق می‌افتد. وارونگی جمعیت برای لیزر امری ضروری است [۳].

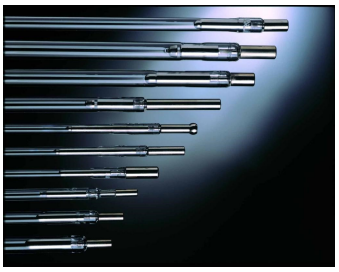


شکل ۳: رفتار الکترون‌های لیزر

دقت شود که انرژی آزادشده به صورت موج نوری خواهد بود که در رزوناتور اپتیکی به دام می‌افتد. این نور منجر به برانگیختگی سایر اتم‌های رزوناتور خواهد شد و در نتیجه از سایر اتم‌ها نیز نور آزاد می‌شود و در نتیجه گسیل القایی در لیزر اتفاق می‌افتد. آینه‌های دو سر رزوناتور، قسمت‌های (۳) و (۵) شکل ۲ به ترتیب بازتابنده[۴۴] و کوپلر خروجی[۴۵]، نور گسیل‌شده را مجدداً به محیط فعال باز می‌گردانند. به این عمل «تقویت» گفته می‌شود. با ادامه این فرآیند، در نهایت نور پرقدرتی، قسمت (۴) شکل ۲، پدید می‌آید و از سوراخ محفظه خارج می‌شود که همان نور لیزر است. در ادامه جزئیات هریک از اجزای لیزر ارائه خواهد شد.

۱.۴ منبع انرژی خارجی یا دمنده

هر انرژی می‌تواند در لیزر به عنوان منبع انرژی در نظر گرفته شود و انرژی موردنیاز جهت تحریک را تأمین کند. یکی از منابع انرژی متداول لامپ فلش[۴۶] است [۶]. لامپ فلش یک لامپ قوس الکتریکی است که با استفاده از جریان الکتریکی می‌تواند در بازه زمانی کم، نور سفید پرقدرتی تولید کند. لامپ فلش از لوله شیشه‌ای حاوی گاز ساخته شده است که الکترودهایی درون آن قرار می‌گیرد. در شکل ۴ چند نمونه لامپ فلش مورد استفاده در لیزر نشان داده شده است.

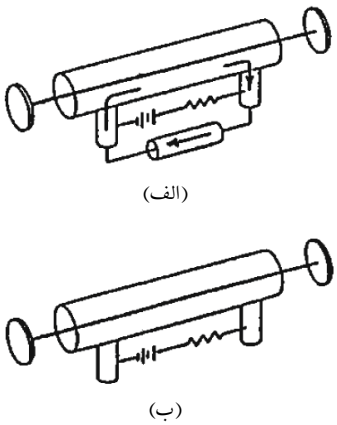


شکل ۴: لامپ فلش مورداستفاده در لیزر

۲.۴ محیط فعال

محیط فعال مجموعه‌ای از اتم‌ها، مولکول‌ها، یون‌ها و در برخی موارد کریستال‌های نیمه‌رسانا ماده هستند [۴]. هر ماده‌ای شامل جامد، مایع، گاز یا پلاسما می‌تواند به عنوان محیط فعال استفاده شود [۶]. برای درک گستردگی جهان لیزر همین بس که حتی از دسر غذا هم می‌توان به عنوان محیط لیزر استفاده کرد [۲۹].

قدرت خروجی لیزر، به محیط فعال بستگی داشته و با کنترل آن می‌توان قدرت لیزر را کنترل کرد. به عنوان مثال، در یک مطالعه چنانچه جریان محوری و سریع کربن دی‌اکسید در نظر گرفته شود، می‌توان لیزری با قدرت ۰/۷ کیلو وات بر متر تولید کرد (شکل ۵الف). این در حالیست مطابق شکل ۵ب، با جریان آرام یا ساکن همین گاز، قدرت لیزر ۰/۰۵ کیلو وات بر متر خواهدبود. بنابراین نه تنها ماده محیط، بلکه جهت و سرعت آن نیز بر قدرت لیزر تأثیرگذار است [۶].



شکل ۵: نمای شماتیک لیزر با محیط؛ الف) جریان محوری و سریع، ب) جریان آرام کربن دی‌اکسید [۶]

۳.۴ محفظه یا رزوناتور اپتیکی

رزوناتور اپتیکی یا حفره اپتیکی محفظه‌ای است که در آن از محیط فعال، پرتوی نور تولید می‌شود [۶]. به منظور تشدید موج نوری، در دو طرف محفظه دو آینه به صورت موازی نصب شده است. بدین‌ترتیب موج نوری تولیدشده در این محیط بین دو آینه به صورت رفت و برگشتی عمل کرده و به نوعی تشدید می‌شود [۳۰]. برای مطالعه بیشتر انواع رزوناتورهای اپتیکی می‌توان به مراجع [۲۸، ۳۱، ۳۲] مراجعه کرد.

[44] reflector [45] output coupler [46] flash lamp

۵ امواج خروجی لیزر

نور ساطع‌شده از رزوناتور اپتیکی لیزر می‌تواند به دو صورت پیوسته یا گسسته باشد. در ادامه جزئیات هریک ارائه خواهد شد.

۱.۵ امواج پیوسته[47] یا cw

به طور معمول، پرتوی لیزر به صورت پیوسته از محفظه اپتیکی خارج می‌شود [۵]. قدرت خروجی از لیزرهای cw بازه گسترده‌ای دارد. لیزرهای مایع و یونی نمونه‌هایی از لیزرهای پیوسته است [۳]. این بازه از میلی‌وات مانند لیزرهای ارتباطات اپتیکی یا اسکنرهای اپتیکی، تا چندین مگاوات (تا ۵ مگاوات) مانند لیزرهای مورداستفاده در صنایع نظامی را شامل می‌شود [۳۳].

۲.۵ لیزر گسسته

پرتوی خروجی از لیزر می‌تواند به صورت گسسته باشد. قدرت خروجی از این لیزرها به مراتب بیشتر از لیزرهای cw است [۳۳]. لیزر یاقوت و ان‌دی شیشه دو نمونه از لیزرهای گسسته است [۳]. لیزرهای گسسته را می‌توان به دو نوع لیزر فمتوثانیه‌ای[48] و پالسی[49] تقسیم‌بندی کرد [۵]. در ادامه هر یک توضیح داده می‌شود.

۱.۲.۵ لیزر فمتوثانیه‌ای

هنگامی که بازه گسستگی امواج لیزر در حد ۵ فمتوثانیه باشد به آن لیزر فمتوثانیه‌ای گفته می‌شود. دقت شود که هر فمتوثانیه (fs) برابر با $۱۰^{-۱۵}$ ثانیه است [۵]. برخی از لیزرهای سیال نمونه‌ای از این لیزرها هستند [۳۴].

۲.۲.۵ لیزر پالسی

هنگامی بازه گسستگی موج خروجی از لیزر در حد پیکوثانیه، نانوثانیه، میلی‌ثانیه و میکروثانیه باشد به آن لیزر پالسی[50] گفته می‌شود [۵]. لیزر اکزمیر نمونه‌ای از این لیزر است [۳۵].

۶ انواع لیزر

جهان لیزر به حدی گسترده است که از دیدگاه‌های مختلفی می‌توان انواع آن را تقسیم‌بندی کرد. طبقه‌بندی بر اساس اندازه طول‌موج پرتوی خروجی و نوع ماده محیط فعال دو نمونه از این تقسیم‌بندی است [۳۳]. در ادامه جزئیات هریک از این تقسیم‌بندی‌ها ارائه خواهد شد.

۱.۶ تقسیم‌بندی بر اساس طول‌موج پرتوی خروجی

بازه طول‌موج پرتوی خروجی از لیزر بازه گسترده‌ای است. متناسب با این طول‌موج، انواع لیزر عبارتند از لیزرهای فروسرخ[51]، مرئی[52]، فرابنفش[53] و اشعه اکس[54] [۵]. به عنوان مثال لیزر هلیوم–نئون پرتویی با طول‌موج حدود ۶۳۲/۸ نانومتر تولید می‌کند [۲۷]. طول‌موج لیزر کربن دی‌اکسید بین ۹/۶ تا ۱۰/۶ میکرومتر است [۵]. این در حالیست که طول‌موج لیزرهای فایبر و اکزمیر به ترتیب در ناحیه فروسرخ و فرابنفش قرار می‌گیرند [۲۷]. دقت شود که در لیزرهای قابل تنظیم[55]، اندازه طول‌موج می‌تواند متغیر باشد، برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مرجع [۳۶] مراجعه کرد.

۲.۶ تقسیم‌بندی بر اساس نوع ماده محیط فعال

متناسب با نوع ماده محیط فعال، انواع مختلفی از لیزر وجود دارند که شامل لیزرهای گاز، جامد و مایع هستند [۳۷]. در ادامه جزئیات هریک از لیزرها ارائه خواهد شد.

۱.۲.۶ لیزر گاز

در لیزرهای گازی، گاز در داخل رزوناتور جریان می‌یابد. هنگامی که گاز جریان می‌یابد، از دو الکترود می‌گذرد که یکی دارای بار مثبت و دیگری بار منفی هستند. الکترون‌هایی که بین الکترودها جریان می‌یابند، الکترون‌های اتم‌های گاز در حال جریان را به ترازهای انرژی بالا پمپاژ می‌کنند [۳].

گازهای مختلفی می‌توانند به عنوان محیط فعال در لیزرها استفاده شوند. لیزر گازها شامل لیزر کربن دی‌اکسید، کربن مونوکسید، هلیوم–نئون، هلیوم–کادمیم، آرگون، کریپتون، مولکولی ازت، اگزمیر، بخار مس و بخار طلا نمونه‌ای از این لیزرها هستند [۳۸].

۲.۲.۶ لیزر جامد

برای اینکه بلور جامدی بتواند به عنوان ماده فعال لیزر استفاده شود باید خصوصیات خاصی داشته باشد. بلور باید به گونه‌ای شفاف باشد که نور بتواند برای برانگیزش محیط وارد آن شود. همچنین این شفافیت باید به حدی باشد که باریکه لیزر بتواند از آن خارج شود. محیط فعال لیزر می‌تواند جامدات مختلفی باشند. نمونه‌ای از لیزرهای جامد عبارتند از لیزر یاقوت، نئودیمیم یاگ یا ان دی‌یگ و فایبر است [۳، ۵].

۳.۲.۶ لیزر مایع

در برخی لیزرها از مایع به عنوان محیط فعال استفاده می‌شود. با توجه به اینکه مایعات متراکم‌تر از گازها هستند، لیزرهای مایع این مزیت را دارند که با جاری‌شدن، خنک‌سازی راحت‌تر در آن‌ها انجام می‌شود. لیزرهای رنگی[56] نمونه‌ای از این لیزرها هستند.

دقت شود که لیزرهای رنگی در یک محیط حلال مانند الکل [۳]، اتیلن گلیکول [۳] یا آب [۶] حل می‌شوند. در این لیزرها منبع خروجی فلش لامپ یا لیزر دیگر است. به عنوان مثال در لیزر رودامین ۶جی[57] که محیط فعال آن رنگی است، منبع انرژی آن می‌تواند لیزر یونی آرگون یا کریپتون باشد. پرتوی تولیدشده از این لیزر می‌تواند طول‌موجی به بازه ۵۷۰ نانومتر تا ۶۵۵ نانومتر را شامل شود [۳]. کومارین[58] ۲ و کومارین ۳۰ دو نمونه دیگر از رنگ‌های

[47] continuous wave [48] femtosecond laser [49] pulsed laser [50] pulsed laser [51] infrared laser [52] visible laser [53] ultraviolet laser [54] x-ray laser
[55] tunable laser [56] dye laser [57] Rhodamine 6G [58] Coumarin

مورداستفاده در لیزر مایع هستند [۶].

۳.۶ مثال‌های انواع لیزر

با توجه به تقسیم‌بندی انواع لیزر، برای درک بهتر، طول‌موج و نوع محیط فعال نمونه برخی لیزرهای پرکاربرد در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: انواع لیزرها، نوع ماده، طول‌موج پرتوی خروجی از آن‌ها [۳۷].

ماده	نام لیزر	طول‌موج
گاز	کربن دی‌اکسید	۱۰/۶ μm
	دی‌نیتروژن مونوکسید	۱۰/۶ μm
	کربن مونوکسید	۵ – ۶/۵ μm
	هلیوم–نئون	۶۳۲/۸ nm
	نیتروژن	۳۳۶ nm
مایع	فلئورسنس	۰/۳ – ۱/۱ μm
جامد	یاقوت	۶۹۴/۳ nm
	اندی‌یاگ	۱/۰۶ μm
	فایبر	۱/۰۳ μm

۷ کاربرد لیزر در صنعت

لیزر مبحثی زنده از علم است که هر روزه ذهن کثیری از محققان و دانشمندان را به خود مشغول کرده است. گواه این امر، اختراعاتی است که لحظه به لحظه در این زمینه در اختیار بشر قرار می‌گیرد. یکی از گسترده‌ترین حوزه‌های لیزر، حضور آن در صنعت است. لیزر در صنعت ساخت و تولید کاربردهای گسترده دارد به عنوان مثال می‌توان از نشانه‌گذاری[۵۹]، برش، جوش، حکاکی، تمیزکاری، تولید افزایشی[۶۰]، سخت‌کاری[۶۱] و پوشش‌دهی لیزر[۶۲] نام برد. دلیل استفاده از لیزر در صنعت، مزایای چشمگیر آن در مقایسه با سایر روش‌های سنتی ساخت و تولیدی است از جمله:

- انرژی بسیار متمرکز و موضعی
- غیرتماسی بودن
- شدت انرژی بالا
- بی‌خطر بودن
- دقت بسیار بالا
- دوست‌دار محیط‌زیست بودن
- سرعت بالا

در ادامه، جزئیات هریک از کاربردهای صنعتی لیزر و مزایای آن ارائه خواهد شد.

۱.۷ نشانه‌گذاری لیزر

یکی از پرکاربردترین لیزرهای نشانه‌گذاری، لیزر پالسی فایبر است. لیزر نشانه‌گذاری همانند لیزر حکاکی، بر سطح قطعه‌کار اعمال می‌شود، منتهای امر لیزر حکاکی عمق بیشتری را در قطعه کار ایجاد می‌کند. در فرآیند لیزر نشانه‌گذاری محدودیت ماده وجود نداشته و می‌توان با آن روی هر ماده‌ای نظیر سرامیک، پلاستیک، لاستیک، چوب، فلز و حتی کامپوزیت‌های کربنی علامت‌گذاری کرد. نشانه‌گذاری اعمال‌شده می‌تواند ساده به صورت سیاه–سفید و یا رنگی باشد [۳۹]. دو نمونه از لیزر رنگی در شکل‌های ۶الف و ۶ب مشاهده می‌شود.

(الف) (ب)

شکل ۶: لیزر رنگی نشانه‌گذاری الف) نمونه اول، ب) نمونه دوم [۳۹]

در صنعت از لیزر نشانه‌گذاری بیشتر به منظور علامت‌گذاری نظیر بارکد، نام قطعه، شماره سریال یا لوگو استفاده می‌شود.

لیزر نشانه‌گذاری مزایای بسیاری نسبت به راه‌های دیگر نشانه‌گذاری دارد. نخست اینکه نشانه‌گذاری لیزر دوام بیشتری نسبت به سایرین دارد. نشانه‌گذاری لیزر به صورت غیرتماسی و با مواد مصرفی کم‌تر بر قطعه کار اعمال می‌شود. دقت و سرعت این روش بسیار بالاتر از روش‌های دیگر است. لیزرهای فایبر پیوسته و پالسی دو نمونه از این لیزرها است که در قطعات صنعتی نظیر خودروسازی [۴۰]، هواپیماسازی [۴۱]، پزشکی [۴۲] و جواهرسازی [۴۳] کاربرد دارد.

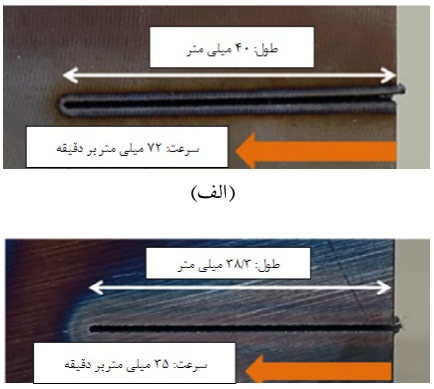
۲.۷ برش لیزر

برش لیزر فرآیندی است که در آن با استفاده از پرتوی لیزر قطعه برش داده می‌شود. در این روش می‌توان قطعات کوچک و با دقت بالا و یا قطعات با ابعاد و ضخامت بزرگ را برش‌کاری کرد. با تغییر شرایط تمرکز پرتوی لیزر، به راحتی می‌توان مواد مختلفی را با لیزر برش داد. علاوه بر عدم محدودیت لیزر برش در هندسه قطعه، این دستگاه محدودیت در نوع ماده قطعه کار نیز ندارد. موادی نظیر فلزات (مس، آلومینیوم، برنج، تنگستن، فولاد و تیتانیوم)، سنگ‌های قیمتی (الماس)، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌های کربنی، سیلیکون و انواع پلاستیک را می‌توان به راحتی با لیزر برش، برید. یکی دیگر از مزایای فرآیند برش لیزر نسبت به روش های مرسوم برش‌کاری صنعتی شامل واترجت، سرعت بسیار بالای برش است.

برش لیزر یک فرآیند غیرتماسی است که این خود مزایای بسیاری دارد. به عنوان مثال، اثرات جانبی نظیر اعوجاج یا پارگی که به دلیل تماس ایجاد می‌شود، در قطعه کار کاهش می‌یابد. به علاوه، به دلیل عدم ارتباط مستقیم اپراتور به قسمت برنده و قطعه کار، برش لیزر امن‌تر از سایر روش‌های برش‌کاری است. برای مطالعه بیشتر برتری برش‌کاری لیزر با سایر روش‌ها می‌توان به پژوهش [۴۴] مراجعه کرد.

دقت شود که دنیای کاربرد برش‌کاری لیزر از صنایع الکترونیک [۴۵] و پزشکی [۴۶] شروع شده و شامل صنایع هسته‌ای [۴۷] و حتی به کشاورزی و قطع گیاهان [۴۸] نیز وارد شده است. برای درک دقت برش، در شکل‌های ۷الف و ۷ب، به ترتیب، دو نمونه از قطعات از جنس فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی برش داده‌شده با لیزر قرار داده شده است. جهت، طول و سرعت برش نیز در شکل مشاهده می‌شود [۴۷].

[59] marking [60] additive manufacturing [61] hardening [62] laser cladding

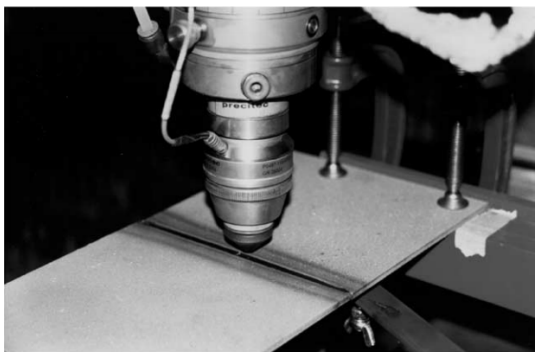


شکل ۷: قطعه برش‌کاری شده لیزر از جنس؛ الف) فولادزنگ‌نزن، ب) فولاد کربنی [۴۷]

۳.۷ جوش لیزر

جوش‌کاری لیزر عبارت است از جوش قطعات با هم، به طور همزمان. به عبارت دیگر، یک یا چند قطعه مشابه یا متفاوت را با این روش می‌توان با هم جوش داد. جوش قطعات غیرهم‌جنس از جمله چالش‌های جوش‌کاری بوده است که با جوش‌کاری لیزر راه‌حلی برای آن ارائه شده است. جوش‌کاری لیزر، بر خلاف سایر روش‌های جوش‌کاری، دقت بالا و دائمی را در هر شکل از جوش‌کاری همیشه فراهم می‌کند. از جمله مزیت‌های این روش جوش‌کاری می‌توان مقاومت بالای محل جوش را نام برد. همچنین، اعوجاج حرارتی جوش‌کاری لیزر بسیار کم‌تر از روش‌های سنتی جوش است. به علت موضعی بودن پرتو لیزر، ناحیه متأثر از جوش لیزر بسیار کوچک‌تر از روش‌های دیگر جوش است. به علاوه، در این روش نیازی به مراحل پس‌فرآیندی نظیر پاک‌سازی سرباره وجود ندارد.

جوش‌کاری لیزر در قطعات در ابعاد میکرو مورد استفاده در صنایعی نظیر الکترونیک [۴۹] و پزشکی [۵۰] بسیار پرکاربرد است. از طرفی در صنایع حجیم و بزرگی مانند خودروسازی و هواپیماسازی [۴۹] نیز از جوش‌کاری لیزر بسیار استفاده می‌شود. در شکل ۸، قطعه تحت جوش‌کاری لیزر مشاهده می‌شود [۵۱].



شکل ۸: قطعه تحت جوش‌کاری لیزر [۵۱]

۴.۷ تمیزکاری لیزر

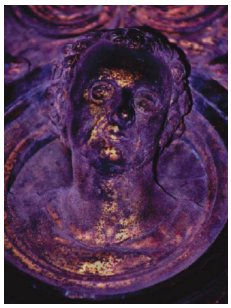
تمیزکاری لیزر فرآیندی است که به وسیله آن آلاینده‌ها، پلیسه، ضایعات و برخی ناخالصی‌ها از سطح قطعه‌کار رفع می‌شود. دو روش کلی در فرآیند تمیزکاری لیزر استفاده می‌شود که عبارتند از:

- برداشتن قسمتی از لایه سطح قطعه‌کار
- برداشتن کل لایه سطح قطعه‌کار

با توجه به اینکه در تمیزکاری لیزر از هیچ ماده شیمیایی مضر استفاده نمی‌شود، بنابراین این روش تا حد امکان خطراتی نداشته و امن است. از طرفی در این روش تنها ضایعات از سطح قطعه‌کار پاک‌سازی می‌شود و در نتیجه خود روش به تنهایی ضایعات جداگانه‌ای تولید نمی‌کند. بنابراین در مقایسه با روش‌های سنتی، تمیزکاری لیزر، به نوعی دوستدار محیط‌زیست است. تمیزکاری لیزر روشی غیرتماسی است که مانند سایر کاربردهای صنعتی لیزر، خطرات مورد توجه اپراتور تا حد امکان در آن کاهش می‌یابد.

در تمیزکاری لیزر، از پالس‌ها با فاصله زمانی کم و قدرت بالا استفاده می‌شود. تمامی این شرایط بدون تماس با سطح قطعه‌کار و در نتیجه، بروز آسیبی به آن اتفاق می‌افتد. بنابراین این روش در تمیزکاری صفحات نازک و سطوح پیچیده مانند آثار هنری گزینه بسیار مناسبی خواهد بود. تمیزکاری لیزر در فرآیندهای تولیدی نظیر جوش و نقاشی که پیش از آن نیاز به پاک‌سازی قطعات و صفحات است، بسیار کاربرد دارد. در این روش به راحتی می‌توان روغن، زنگ و اکسیدها را از سطوح زدود.

در سایر تمیزکاری‌های صنعتی نظیر پاکسازی قالب، ابزار و حذف پوشش فویل باتری نیز از تمیزکاری لیزر استفاده می‌شود. در کنار قطعات کوچک، از این روش در تمیزکاری قطعات بزرگ‌مقیاس نظیر زدودن زنگ پل، رفع پلیسه در صفحات هواپیماها و قطارها [۵۲] و حتی پاک‌سازی دیوار [۵۳] نیز استفاده می‌شود. تمیزکاری لیزر علاوه بر صنعت، در هنر نیز راه پیدا کرده است. در شکل‌های ۹الف و ۹ب، قطعه هنری قبل و پس از تمیزکاری لیزر مشاهده می‌شود [۵۴].


(الف)

(ب)

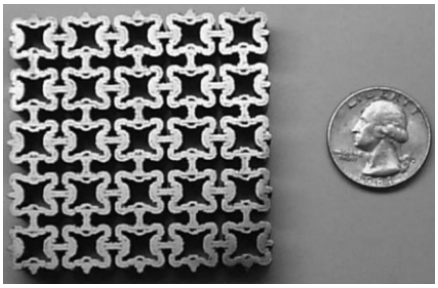
شکل ۹: قطعه هنری؛ الف) قبل، ب) پس از تمیزکاری لیزر [۵۴]

۵.۷ تولید افزایشی لیزر

تولید افزایشی فرآیندی است که به سبب آن، فرآیند تولید یک قطعه سه بعدی به صورت لایه به لایه و از پایین به بالا انجام می شود. به همین علت، نام دیگر این روش «پرینت سه‌بعدی» است. در این روش با استفاده ترکیبی از ماشین‌ها، اغلب پرینتر، و نرم‌افزارهای کامپیوتری، هندسه‌های پیچیده ساخته و پرداخته می‌شود. این تکنولوژی نوپا، قدمتی در حدود سی سال دارد. به علت تطبیق‌پذیری و مزایای چشمگیر آن، راه خود را به سرعت در صنعت پیدا کرده است.

با تولید افزایشی لیزر، پیچیده‌ترین، غیرعادی‌ترین و منحصربه‌فردترین قطعات را می‌توان تولید کرد. به دلیل این مزیت است که تولید افزایشی لیزر در ساخت زیورآلات کاربرد دارد. با این روش قطعات سبک‌وزن و حتی توخالی مورد استفاده در صنایع هوافضا را می‌توان تولید کرد. مزیت دیگر تولید افزایشی لیزری، تولید قطعات پیوسته و بدون نیاز به جوش و اتصال است. به سبب این شرایط، علاوه بر ارتقای جنبه بصری قطعه، استحکام آن نیز افزایش می‌یابد. به علاوه، در این روش نیاز به اجزا، ابزارهای جداگانه اضافی به منظور ساخت قطعه نیز از بین رفته و در نتیجه، ساخت قطعه ارزان قیمت‌تر خواهد بود. برای مطالعه بیشتر می‌توان به مقالات [۵۵–۵۷] رجوع کرد.

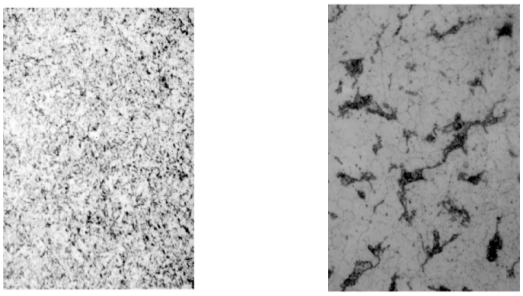
تولید افزایشی لیزر، محدودیتی در جنس قطعه نداشته و بر موادی نظیر پلاستیک، فلز، شیشه، بتن و حتی غذا می‌توان آن را اعمال کرد. با این وجود، کاربرد گسترده این روش در قطعات فلزی است. برای درک دقت روش تولید افزایشی لیزر، در شکل ۱۰ یک نمونه قطعه ساخته‌شده دارای پیچیدگی بالای هندسی مشاهده می‌شود. دقت شود به منظور درک ابعاد کوچک قطعه، در کنار شکل یک سکه قرار داده شده است [۵۵]. در فرآیند تولید افزایشی لیزر مواد فلزی، موضعی بودن انرژی لیزر مانع از ذوب شدن لایه های زیرین به هنگام فرآیند ساخت می شود که این امر منجر به دقت و کیفیت (کیفیت خواص مکانیکی و متالورژی) بالای این فرآیند نسبت به سایر روش های تولید افزایشی می‌شود.



شکل ۱۰: قطعه ساخته‌شده با استفاده از تولید افزایشی لیزر [۵۵]

۶.۷ سخت‌کاری لیزر

سخت‌کاری لیزر یا اصلاح حرارتی[۶۳] فرایندی است به منظور ارتقای سختی که بر سطح قطعاتی انجام می‌شود که تحت خستگی قرار می‌گیرند. بنابراین به طور محلی سختی سطح قطعه افزایش می‌یابد. در این فرایند پرتوی لیزر مستقیماً به سطح قطعه کار تابانیده می‌شود، در نتیجه سطح، در محدوده کوچکی و در بازه زمانی کم تا دمایی فراتر از دمای آستنزیتی (تقریباً ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) حرارت می‌بینند. از مزایای این روش می‌توان تمرکز دقیق انرژی حرارتی با منطقه متأثر حرارتی[۶۴] حداقلی، کاهش اعوجاج و در نتیجه عدم نیاز به ماشین‌کاری، کاهش تنش‌های پسماند ناشی از سخت‌کاری، کاهش احتمال بروز ترک در قطعه کار و عدم نیاز به سیستم خنک‌کاری نام برد [۶]. برای درک اهمیت این روش، در شکل ۱۱، قطعه فولاد به ترتیب قبل و بعد از فرایند سخت‌کاری لیزر کربن دی‌اکسید ۱۰۰ وات مشاهده می‌شود [۵۸].



(الف) (ب)

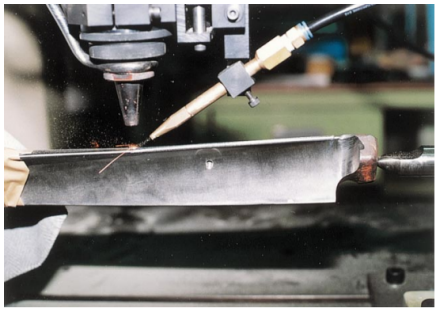
شکل ۱۱: تصویر متالورژیکی ورق فولاد؛ الف) قبل از سخت‌کاری، ب) پس از سخت‌کاری [۵۸]

مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که پس از اعمال فرایند سخت‌کاری، دانه‌بندی قطعه ریزتر و در نتیجه سختی متالورژیکی قطعه افزایش می‌یابد. از سخت‌کاری لیزر در صنایع بزرگی مثل خودروسازی در شفت خودرو [۵۹] و دریچه موتور [۶۰] استفاده می‌شود. برای درک بیشتر سخت‌کاری لیزر می‌توان به پژوهش [۶۱] مراجعه کرد.

۷.۷ پوشش‌دهی لیزر

پوشش‌دهی لیزر فرآیندی است که به سبب آن، لایه‌ای از ماده با استفاده از جوشکاری لیزر بر سطح قطعه کار قرار می‌گیرد. در این روش پرتوی لیزر حکم منبع انرژی را دارد که با تابیده شدن بر سطح قطعه کار، پودر را ذوب کرده و در نتیجه منجر به اتصال لایه‌ای (۰/۲ تا ۴ میلی‌متر) دو فلز به یکدیگر می‌شود. دقت شود که علت استفاده از این روش به جای روش‌های سنتی نظیر جوش پلاسمای آرک و گاز تنگستن، کاهش منطقه متأثر حرارتی و در نتیجه کاهش اعوجاج، اتصال متالورژیکی عالی با توجه به دانه‌بندی مناسب، عدم محدودیت در شکل و هندسه در عین کیفیت بالا (حتی می‌توان لبه‌های یک هندسه پیچیده را پوشش‌دهی کرد) است. برای درک بهتر فرایند پوشش‌دهی لیزر می‌توان به مرجع [۶۲] مراجعه کرد.

با مزایای مذکور، پوشش‌دهی لیزر به منظور ترمیم هندسه قطعه‌کار و محافظت قطعه‌کار در برابر تخریب و خوردگی در صنایع مختلفی کاربرد دارد [۶]. به عنوان مثال از پوشش‌دهی لیزر در قطعات سازه‌های فضایی [۶۳] و پره توربین [۶۴] استفاده می‌شود. به عنوان مثال در شکل ۱۲، لبه پره توربین در حین فرایند پوشش‌دهی مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲: لبه پره توربین در حین فرایند پوشش‌دهی لیزر [۶۵]

[63] heat treatment [64] Heat Affected Zone (HAZ)

۸ نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت و کاربرد گسترده لیزر، در گزارش حاضر ابتدا تاریخچه و فیزیک حاکم بر لیزر به بیان ساده ارائه شد. چهار برجستگی نور لیزر بیان شدند. سپس، هریک از اجزای لیزر معرفی شدند. بیان شد که متناسب با نوع ماده فعال، لیزرها به سه دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. از دیدگاه دیگر مشاهده شد که مطابق با نوع پرتوی خروجی از لیزرها نیز می‌توان آن‌ها را به دو گروه دسته‌بندی کرد. برای هر یک از این دسته‌بندی‌ها مثال‌هایی از لیزرهایی مدرن، ارائه شد.

کاربرد لیزر در صنعت به ویژه در ساخت و تولید نیز معرفی شد. مشاهده شد برتری لیزرهای صنعتی نسبت به سایر روش‌های سنتی متمرکز بودن منبع انرژی، شدت بالای انرژی، دقت و سرعت بالا، بی‌خطربودن، غیرتماسی‌بودن و دوست‌دارمحیط‌زیست‌بودن آن‌ها است. بیان شد که کاربرد گسترده لیزر در صنعت در حوزه‌های نشانه‌گذاری، برش‌کاری، جوش‌کاری، تمیزکاری، تولید افزایشی، سخت‌کاری و پوشش‌دهی است که هریک از این کاربردها معرفی شد. سپس، هریک از فرآیندهای لیزر توضیح داده شد. در نهایت، برای درک گستردگی و اهمیت فرایندهای مذکور، مثال‌های واقعی هر یک جداگانه مطرح شدند.

مراجع

[1] Wells, Herbert George. *War of the Worlds*. William Heinemann, UK, 1898.

[2] Bertolotti, Mario. *The history of the laser*. CRC press, 2004.

[3] Billings, Charlene W. *Lasers: The New Technology Of Light*. Facts on File, 1992.

[4] Siegman, Anthony E. *Lasers*. University Science Books, Mill Valley, CA, 1986.

[5] Renk, Karl F. *Basics of laser physics*. Springer, 2017.

[6] Mazumder, Jyotirmoy and Watkins, Kenneth G. *Laser Material Processing*. Springer-Verlag London, 2010.

[7] Schawlow, Arthur L and Townes, Charles H. Infrared and optical masers. *Physical Review*, 112(6):1940, 1958.

[8] Ladenburg, R. Research on the anomalous dispersion of gases. *Z. Phys*, 48:15–25, 1928.

[9] Lamb Jr, Willis E and Retherford, Robert C. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review*, 72(3):241, 1947.

[10] Dicke, Robert H. Coherence in spontaneous radiation processes. *Physical review*, 93(1):99, 1954.

[11] Bloembergen, Nicolaas. Proposal for a new type solid state maser. *Physical review*, 104(2):324, 1956.

[12] Schawlow, Arthur L and Townes, Charles H. Masers and maser communications system, March 22 1960. US Patent 2,929,922.

[13] Maiman, T. H. Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187(4736):493–494, 1960.

[14] Sorokin, PP and Stevenson, MJ. Stimulated infrared emission from trivalent uranium. *Physical Review Letters*, 5(12):557, 1960.

[15] Javan, Ali, Bennett Jr, William R, and Herriott, Donald R. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a he-ne mixture. *Physical Review Letters*, 6(3):106, 1961.

[16] Hall, Robert N, Fenner, Gunther E, Kingsley, JD, Soltys, TJ, and Carlson, RO. Coherent light emission from GaAs junctions. *Physical Review Letters*, 9(9):366, 1962.

[17] Geusic, JE, Marcos, HM, and Van Uitert, LeGrand. Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets. *Applied Physics Letters*, 4(10):182–184, 1964.

[18] Patel, C Kumar N. Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO_2. *Physical review*, 136(5A):A1187, 1964.

[19] Bridges, William B. Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum. *Applied Physics Letters*, 4(7):128–130, 1964.

[20] Kasper, Jerome VV and Pimentel, George C. Hcl chemical laser. *Physical Review Letters*, 14(10):352, 1965.

[21] Silfvast, William T, Fowles, Grant R, and Hopkins, BD. Laser action in singly ionized ge, sn, pb, in, cd and zn. *Applied Physics Letters*, 8(12):318–319, 1966.

[22] Geiges, Michael L. History of lasers in dermatology. in *Basics in dermatological laser applications*, vol. 42, pp. 1–6. Karger Publishers, 2011.

[23] George, Roy. Laser in dentistry-review. *International Journal of Dental Clinics*, 1(1), 2009.

[24] Holmström, Sven TS, Baran, Utku, and Urey, Hakan. Mems laser scanners: a review. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(2):259–275, 2014.

[25] Gautam, Girish Dutt and Pandey, Arun Kumar. Pulsed nd: Yag laser beam drilling: A review. *Optics & Laser Technology*, 100:183–215, 2018.

[26] Wang, WC, Zhou, B, Xu, SH, Yang, ZM, and Zhang, QY. Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers. *Progress in Materials Science*, 2018.

[27] Hitz, C Breck, Ewing, James J, and Hecht, Jeff. *Introduction to laser technology*. John Wiley & Sons, 2012.

[28] Hodgson, Norman and Weber, Horst. *Optical resonators: fundamentals, advanced concepts, applications*, vol. 108. Springer Science & Business Media, 2005.

[29] Svelto, Orazio. Properties of laser beams. in *Principles of Lasers*, pp. 475–504. Springer, 2010.

[30] Hansch, T, Pernier, M, and Schawlow, A. Laser action of dyes in gelatin. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 7(1):45–46, 1971.

[31] Steen, W.M. *Laser Material Processing*. Springer London, 2013.

[32] Kudryashov, Alexis V and Weber, Horst. *Laser resonators: novel design and development*. SPIE press, 1999.

[33] Hall, Dennis. *The physics and technology of laser resonators*. CRC Press, 1990.

[34] Hoppius, Jan S, Maragkaki, Stella, Kanitz, Alexander, Gregorčič, Peter, and Gurevich, Evgeny L. Optimization of femtosecond laser processing in liquids. *Applied Surface Science*, 467:255–260, 2019.

[35] Joffe, Stephen N and Oguro, Yanao. *Advances in Nd: YAG laser surgery*. Springer Science & Business Media, 2012.

[36] Duarte, Frank J. *Tunable laser applications*. CRC press, 2016.

[37] Abramczyk, Halina. *Introduction to laser spectroscopy*. Elsevier, 2005.

[38] Beesley, Michael John. *Lasers and their applications*. Taylor and Francis, 1971.

[39] Gao, Wenyan, Xue, Yafei, Li, Guang, Chang, Chang, Li, Benhai, Hou, Zhenxing, Li, Kai, and Wang, Junlong. Investigations on the laser color marking of tc4. *Optik*, 182:11–18, 2019.

[40] Shimokawa, Kiyofumi. Laser marking method, July 11 1989. US Patent 4,847,181.

[41] Tam, SC, Williams, R, Yang, LJ, Jana, S, Lim, Lennie EN, and Lau, Michael WS. A review of the laser processing of aircraft components. *Journal of materials processing technology*, 23(2):177–194, 1990.

[42] Ogrodnik, PJ, Moorcroft, CI, and Wardle, Peter. The effects of laser marking and symbol etching on the fatigue life of medical devices. *Journal of medical engineering*, 2013, 2013.

[43] Veiko, V, Odintsova, G, Vlasova, E, Andreeva, Ya, Krivonosov, A, Ageev, E, and Gorbunova, E. Laser coloration of titanium films: New development for jewelry and decoration. *Optics & Laser Technology*, 93:9–13, 2017.

[44] Krajcarz, Daniel. Comparison metal water jet cutting with laser and plasma cutting. *Procedia Engineering*, 69:838–843, 2014.

[45] Kagawa, Yutaka, Utsunomiya, Shin, and Kogo, Yasuo. Laser cutting of CVD-SiC fibre/A6061 composite. *Journal of materials science letters*, 8(6):681–683, 1989.

[46] Muhammad, N, Whitehead, D, Boor, A, and Li, L. Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316l stainless steel tubes for medical device applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15):2261–2267, 2010.

[47] Shin, Jae Sung, Oh, Seong Yong, Park, Hyunmin, Chung, Chin-Man, Seon, Sangwoo, Kim, Taek-Soo, Lee, Lim, and Lee, Jonghwan. Laser cutting of steel plates up to 100 mm in thickness with a 6-kw fiber laser for application to dismantling of nuclear facilities. *Optics and Lasers in Engineering*, 100:98–104, 2018.

[48] Heisel, Torben, Schou, Jørgen, Christensen, Svend, and Andreasen, C. Cutting weeds with a CO_2 laser. *Weed research*, 41(1):19–29, 2001.

[49] Cao, Xin-jin, Jahazi, M, Immarigeon, JP, and Wallace, W. A review of laser welding techniques for magnesium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 171(2):188–204, 2006.

[50] Amanat, Negin, Chaminade, Cedric, Grace, John, McKenzie, David R, and James, Natalie L. Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether–ether–ketone for applications in the medical device industry. *Materials & design*, 31(10):4823–4830, 2010.

[51] Tsirkas, SA, Papanikos, P, and Kermanidis, Th. Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. *Journal of materials processing technology*, 134(1):59–69, 2003.

[52] Veiko, VP, Mutin, T Ju, Smirnov, VN, Shakhno, EA, and Batishche, SA. Laser cleaning of metal surfaces: physical processes and applications. in *Fundamentals of laser assisted micro-and nanotechnologies*, vol. 6985, p. 69850D. International Society for Optics and Photonics, 2008.

[53] Gaetani, Carolina and Santamaria, Ulderico. The laser cleaning of wall paintings. *Journal of Cultural Heritage*, 1:S199–S207, 2000.

[54] Siano, Salvatore and Salimbeni, Renzo. Advances in laser cleaning of artwork and objects of historical interest: the optimized pulse duration approach. *Accounts of chemical research*, 43(6):739–750, 2010.

[55] Gu, DD, Meiners, Wilhelm, Wissenbach, Konrad, and Poprawe, Reinhart. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International materials reviews*, 57(3):133–164, 2012.

[56] Gebhardt, Andreas. Understanding additive manufacturing. 2011.

[57] Frazier, William E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6):1917–1928, 2014.

[58] Ganeev, R.A. Low-power laser hardening of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2):414 – 419, 2002.

[59] Lima, Milton Sergio Fernandes de, Goia, Flávia Aline, Riva, Rudimar, and Espírito Santo, Ana Maria do. Laser surface remelting and hardening of an automotive shaft sing a high-power fiber laser. *Materials Research*, 10:461 – 467, 12 2007.

[60] Slatter, T., Taylor, H., Lewis, R., and King, P. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact. *Wear*, 267(5):797 – 806, 2009. 17th International Conference on Wear of Materials.

[61] Dinesh Babu, P., Balasubramanian, K.R., and Buvanashekaran, G. Laser surface hardening: a review. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 5(2-3):131–151, 2011. PMID: 41398.

[62] Toyserkani, Ehsan, Khajepour, Amir, and Corbin, Stephen F. *Laser cladding*. CRC press, 2004.

[63] Sexton, L., Lavin, S., Byrne, G., and Kennedy, A. Laser cladding of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1):63 – 68, 2002.

[64] Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W.D., Bamberger, M., and Weisheit, A. Laser cladding of turbine blades. *Surface and Coatings Technology*, 125(1):45 – 48, 2000.

[65] Kathuria, Y.P. Some aspects of laser surface cladding in the turbine industry. *Surface and Coatings Technology*, 132(2):262 – 269, 2000.