بسم الله الرحمن الرحيم

١٠٨٩٢٢

۸۷/۱/۱۰۹۸۲۹
۸۸/۱/۲۶

دانشکده فنی و مهندسی
گروه مواد و متالورژی

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی مواد- خوردگی و حفاظت از مواد

ارزیابی اثر عملیات سطحی لیزری بر رفتار خوردگی فولاد ساده کربنی پوشش داده شده توسط نیکل

استاد راهنما :
دکتر مریم احتشام زاده

استاد مشاور :
دکتر محمد مهدوی

مولف:
احسان خردمند

شهریور ۸۷

۱۳۸۷/۱۲/۲۷

۱۰۸۹۲۲

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه مواد و متالورژی

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچ گونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مذبور شناخته نمی‌شود.

نام و نام خانوادگی **امضا**

استاد راهنما :

داور ۱:

داور۲:

داور۳:

۱۳۸۷ /۱۲/ ۲۷

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی یا نماینده دانشکده:

(حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه است)

تقدیم به همسرم،

پدر،

مادر

و خواهرم

تشکر و قدردانی

در ابتدا می خواهم از راهنمایی ها و حمایت های مادی و اجرایی استاد راهنمایم خانم دکتر مریم احتشام زاده تشکر و قدردانی نمایم. بی شک برخورد علمی ایشان با مسایل باعث غنای این اثر گردید.

بر خود لازم می دانم از سرکار خانم بقایی و دادگری نژاد در مرکز تحقیقات دانشگاه شهید باهنر کرمان که در طول انجام این پروژه با بنده نهایت همکاری را مبذول داشتند و همچنین از آقای دکتر محمد مهدوی استاد بخش فیزیک دانشگاه صنعتی شریف به خاطر در اختیار قرار دادن امکانات لیزر و آقای عباس آذریان در مرکز لیزر و اپتیک دانشگاه صنعتی شریف به خاطر همکاری صمیمانه شان و آقای دکتر رضا شجاع رضوی تشکر و قدردانی نمایم.

در پایان از همسرم به خاطر تحمل سختی های موجود، پدر و مادرم به خاطر زحماتشان و از خواهرم به خاطر حمایت هایش نهایت تشکر را دارم. همچنین تشکر ویژه از دوستان خوبم آقایان علیرضا حاتمی و علی ساوه ای ابراز می دارم.

خردمند- شهریور ۸۷

چکیده

در این تحقیق پوشش های الکترولس نیکل- فسفر پوشش داده شده روی فولاد St۳۷ تحت عملیات سطحی لیزری توسط یک لیزر پالسی Nd-YAG با حداکثر انرژی خروجی ۱۳۰۰ میلی ژول قرار گرفت. ذوب سطحی لیزری با استفاده از دانسیته انرژی های مختلف و سرعت های روبش متفاوت انجام شد. همچنین اثر میزان همپوشانی و عملیات لیزری تحت گاز محافظ آرگون بررسی شد. ریز ساختار، ترکیب شیمیایی و تعیین فازهای موجود با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز EDAX و آنالیز تفرق اشعه x (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سختی پوشش ها توسط آزمون میکروسختی سنجی اندازه گیری شد. رفتار خوردگی پوشش ها در محلول ۳/۵٪ کلرید سدیم با استفاده از روش های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون تافل و پتانسیودینامیک و امپدانس الکتروشیمیایی مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق نتایج پس از عملیات ذوب سطحی لیزری تحت گاز محافظ آرگون مقاومت به خوردگی پوشش ها افزایش یافت، اگرچه پس از عملیات ذوب سطحی لیزری در هوا یک لایه اکسید نیکل در سطح تشکیل شد و مقاومت به خوردگی افزایش بیشتری یافت. همچنین سختی پوشش ها در اثر تشکیل فازهای سخت فسفید نیکل افزایش یافت. نتایج آزمون های امپدانس الکتروشیمیایی در مدت ۱۴ روز غوطه وری در محلول ۳/۵٪ کلرید سدیم بهبود مقاومت به خوردگی پوشش سخت شده در اثر عملیات لیزری را در مقایسه با پوشش الکترولس نیکل- فسفر نشان داد.

واژه های کلیدی: عملیات سطحی لیزری، الکترولس نیکل- فسفر، رفتار خوردگی، میکروسختی

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه ۱

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته ۵

۲-۱- اصول فیزیکی لیزر ۶

۲-۱-۱- تابش پیوسته و تابش برانگیخته ۶

۲-۲ - عمل لیزر ۸

۲-۲-۱- تجمع معکوس در سطوح انرژی ۹

۲-۲-۲ - تشدید کننده نوری ۹

۲-۲-۳- لیزرهای حالت جامد Nd-YAG ۱۱

۲-۳- عملیات لیزری ۱۲

۲-۳-۱-ذوب سطحی لیزری ۱۳

۲-۳-۱-۱- سختکاری در اثر ذوب لیزری ۱۴

۲-۳-۱-۲- شیشه ای کردن ۱۴

۲-۳-۱-۳- چگال کردن (سیل کردن) ۱۵

۲-۳-۲- سخت کردن توسط شوک لیزری ۱۵

۲-۳-۳- عملیات حرارتی لیزری ۱۵

۲-۳-۴- آلیاژسازی لیزری ۱۶

۲-۳-۵- روکش کاری ۱۶

۲-۳-۶- برش کاری لیزری ۱۶

۲-۳-۷- جوشکاری لیزری ۱۶

۲-۴- پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۱۷
۲-۴-۱- مکانیزم رسوب الکترولس نیکل –فسفر ۱۷
۲-۴-۱-۱- ترکیبات محلول ۱۷
۲-۴-۱-۲- حمام های هیپو فسفید سدیم ۱۸
۲-۴-۲- خواص پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۱۹
۲-۴-۲-۱- ساختار پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۱۹
۲-۴-۲-۲- سختی و سایش پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۲۰
۲-۴-۲-۳- مقاومت به خوردگی پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۲۰
۲-۴-۳- اثر عملیات حرارتی بر سختی و رفتار خوردگی پوشش های الکترولس نیکل- فسفر ۳۵
۲-۴-۴-مزیت عملیات لیزری پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۴۰
۲-۵- اثر ذوب سطحی لیزری بر رفتار خوردگی آلیاژها ۴۱
۲-۶- اثر ذوب سطحی لیزری بر سختی و رفتار خوردگی آلیاژهای پایه نیکل ۴۵

فصل سوم

روش تحقیق ۸۴
۳-۱- مراحل مختلف ایجاد پوشش ۸۵
۳-۲- عملیات لیزری ۸۷
۳-۳-آزمایش تعیین میکروسختی ۸۹
۳-۴-آزمایش پراش اشعه X ۸۹
۳-۵- بررسی نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی ۸۹
۳-۶-مطالعات خوردگی توسط آزمونهای الکتروشیمیایی ۸۹

فصل چهارم

نتایج و بحث ۹۱
۴-۱- نتایج سختی و مقاومت به خوردگی پوشش الکترولس نیکل –فسفر ۹۲
۴-۱-۱- شبیه سازی منحنی های امپدانس توسط نرم افزار Zview ۹۸
۴-۲- انجام عملیات سطحی لیزری ۱۰۰
۴-۲-۱- نتایج انتخاب طول موج و قطرپرتو لیزرمناسب جهت انجام عملیات سطحی لیزری ۱۰۰
۴-۲-۲- نتایج عملیات سطحی لیزری پوشش های الکترولس نیکل –فسفر ۱۰۱

۴-۲-۲-۱- نتایج عملیات سطحی لیزری پوشش های الکترولس نیکل - فسفر در دانسیته های انرژی j/cm^2 ۲۰-۴۰ ..... ۱۰۴
۴-۲-۲-۲- نتایج عملیات سطحی لیزری پوشش های الکترولس نیکل --فسفر در دانسیته های انرژی j/cm^2 ۴۰-۶۰ ..... ۱۱۴
۴-۲-۲-۳- نتایج عملیات سطحی لیزری پوشش های الکترولس نیکل- فسفر در دانسیته های انرژی j/cm^2 ۶۰-۸۰ ..... ۱۱۶
۴-۳- نتایج آزمون های سختی سنجی ۱۲۲
۴-۴- نتایج آزمون های پلاریزاسیون سیکلی ۱۲۴
۴-۵ انتخاب بهترین شرایط عملیاتی جهت عملیات سطحی لیزری پوشش های الکترولس نیکل- فسفر ۱۲۵
۴-۶- نتایج آزمایش های امپدانس الکتروشیمیایی در مدت ۱۴ روز ۱۲۷
فصل پنجم
نتیجه گیری نهایی ۱۳۱

منابع و مراجع ۱۳۳

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

عملیات سطحی عمدتاً به منظور بهبود خواص مکانیکی، فیزیکی یا شیمیایی فلزات وآلیاژها بکارمی رود و دامنه وسیعی از فرآیندهای مختلف شامل عملیات حرارتی مرسوم و متداول و عملیات سطحی نوین را در بر می گیرد.

ابداع وگسترش فرآیندهای سطحی نوین منحصر به دهه های اخیر می شود و می توان ادعا کرد این عملیات منشأ تحول و پیشرفت شایانی در تکنولوژی سطح به حساب می آید.

در دهه اخیر استفاده از پرتوهای لیزری شدیداً مورد توجه قرار گرفته است. در این روش انرژی با چگالی نسبتاً زیاد در مدت زمان بسیار کوتاه روی سطح قطعه متمرکز می شود و می توان از این پرتوها برای دستیابی به ترکیب های شیمیایی و میکروساختارهای کاملاً کنترل شده و تکرار پذیر استفاده کرد. همچنین از این روش برای ذوب کردن در مقیاس میکروسکوپی و تولید ترکیب های شیمیایی کاملاً غیرتعادلی در نواحی سطحی و نزدیک به آن در محدوده چند نانومتر تا چندین میکرون ضخامت می توان استفاده کرد. تمرکز انرژی های موضعی در بازه های زمانی کوتاه امکان دستیابی به سرعت های سرد شدنی معادل و یا حتی بیشتر از سرعت های سرد شدن قابل حصول توسط هر روش دیگری را ایجاد می کند. این امر موجب می شود میکروساختارهای غیرتعادلی نظیر فلزات شیشه ای و همچنین محلول های جامد فوق اشباع به وجود آید.

صنایع مدرن امروزه نیازمند قطعاتی با خواص سطحی خاص مانند مقاومت به خوردگی و سایش می باشند. موثرترین واقتصادی ترین راه برای افزایش کارایی سطح قطعات برای مقاومت در محیط های مخرب، ایجاد لایه های سطحی با مقاومت به خوردگی وسایش بالاست. بدین خاطر پوشش های الکترولس نیکل –فسفر به علت مقاومت به خوردگی و سایش بالا، بسیار مورد توجه بوده و از پوشش های مناسب برای بهبود مقاومت به خوردگی فولادها می باشند، به طوری که بیشترین کاربرد این پوشش ها به عنوان پوششی محافظ در برابر خوردگی وسایش روی فولادها است.

این پوشش ها بسته به درصد فسفر می توانند ساختار آمورف تا کریستالی داشته باشند. پوشش های کم فسفر (۵-۳ درصد)، ساختاری کریستالی داشته و سختی و مقاومت به سایش بالایی دارند، از طرف دیگر پوشش های با درصد فسفر بالا (بیش از ۱۰ درصد)، ساختاری آمورف داشته و مقاومت به خوردگی بالایی دارند. همچنین این پوشش ها حاوی ترک های عرضی و تخلخل در اثر تنش های داخلی می باشند. این عیوب در اثر فرآیندهای جاذبه ودافعه در واکنش های اکسیداسیون و احیا و همچنین در اثر رسوب همزمان فسفر ایجاد می شوند.

تاکنون تحقیقات زیادی بر روی عملیات حرارتی پوشش های الکترولس نیکل- فسفر انجام گرفته است. سختی و مقاومت به سایش این پوشش ها خصوصاً پوشش هایی با درصد فسفر بالا پس از عملیات حرارتی در اثر تغییر فاز از آمورف به کریستالی و تشکیل فاز فسفید نیکل افزایش یافته بطوری که سختی آنها به پوشش های کرم سخت می رسد، اما هنگامی که در اثر عملیات حرارتی سخت می شوند انقباض یافته و این انقباض منجر به ترک خوردن پوشش و در معرض خوردگی قرار گرفتن زیر لایه می شود.

از فرآیند لیزر می توان به عنوان نوعی عملیات بعدی برای بهبود خواص پوشش های الکترولس نیکل – فسفر استفاده کرد. عملیات سطحی لیزری قادر به ایجاد میکروساختاری جدید در سطح با ترکیب فازی متفاوت، با ساختاری ریزدانه همراه با کمترین میزان تخلخل و ترک بوده همچنین قادر به ایجاد ترکیبات بین فلزی و افزایش حلالیت در حالت جامد می باشد. در نتیجه یک فرایندکارا در زمینه بهبود خواص سطحی نظیر بهبود عملکرد خوردگی و مقاومت به سایش می باشد، به طوری که در فولادها پس از ذوب سطحی لیزری ناخالصی های مضری مانند سولفیدها، حل شده و در اثر غیرتعادلی بودن وسرعت زیاد فرآیند ذوب و انجماد از تشکیل مجددآنها جلوگیری شده و به صورت فوق اشباع در زمینه آستنیتی حل می شوند و در صورت تشکیل، در اثر سرعت های سرد شدن بالا، ناخالصی های سولفیدی ریز تشکیل شده همچنین ساختار ایجاد شده همگن و ریز دانه می باشد. بنابر این عملیات لیزری باعث بهبود مقاومت به خوردگی فولادها می شود.

به طور کلی برای انجام عملیات سطحی لیزری استفاده از لیزرهای پیوسته CO_2 و لیزر های پالسی Nd-YAG رایج می باشد. مزیت لیزرهای پیوسته CO_2 نسبت به لیزرهای پالسی Nd-YAG، عمق نفوذ بیشتر آن می باشد، به طوری که از این لیزرها برای آلیاژسازی لیزری و فرآیندهایی که نیاز به عمق ذوب بیشتر می باشد، استفاده می شود. از طرف دیگر لیزرهای پالسی از طریق تماس سریع انرژی با سطح ماده در طی دوره پالس متغیر از صد ها نانو ثانیه تا چند پیکو ثانیه، قادر به ایجاد ناحیه متأثر از حرارت کوچک می باشند.

مطالعات انجام گرفته روی آلیاژهای پایه نیکل لیزر شده توسط لیزرهای پالسی نانو ثانیه نشان می دهدکه ذوب سطحی لیزری این آلیاژها باعث حذف ترک های موضعی شده و فیلم محافظ تر و همگن با پتانسیل خوردگی نجیب وآهنگ خوردگی پایین تشکیل می شود.

تحقیقات متعددی بر روی عملیات لیزری پوشش های الکترولس نیکل - فسفر توسط لیزرهای پیوسته CO_2 و لیزرهای پالسی Nd-YAG انجام گرفته است. مطابق تحقیقات صورت گرفته در لیزرهای پیوسته کنترل فرآیند مشکل بوده و رقیق شدن پوشش با زیر لایه صورت می گیرد که این امر باعث کاهش شدید مقاومت به خوردگی پوشش شده و کاهش سختی را نیز به دنبال دارد. مزیت عمده لیزرهای پالسی خصوصاً لیزرهای پالسی نانو ثانیه آهنگ های سریع ترگرم شدن و سرد شدن، ایجاد سطوح صاف و همگن، توانایی پوشاندن تخلخل ها و قابلیت ایجاد تغییرات فازی در این پوشش ها توسط عملیات لیزری می باشد.

درتحقیق حاضرعملیات سطحی لیزری توسط لیزر پالسی Nd-YAG نانوثانیه انجام گرفت. رفتار خوردگی پوشش ها قبل و پس از عملیات لیزری توسط روش های الکتروشیمیایی بررسی شد. مطالعه ساختار فازی نمونه ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و تفرق اشعه ایکس انجام گرفت. همچنین سختی نمونه ها قبل و پس از عملیات لیزری بررسی شد.

فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

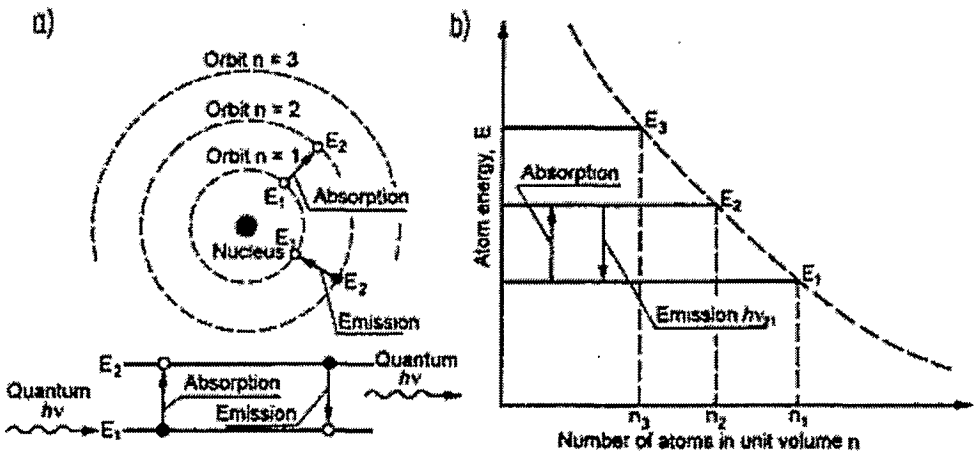
۲-۱- اصول فیزیکی لیزر

۲-۱-۱- تابش پیوسته[1] و تابش برانگیخته[2]

تمام سیستم های اتمی درحالت های کوانتمی مشخصی، به عبارت دیگر سطح انرژی مشخصی قرار دارند. هرگونه تغییر دراین سطح انرژی به شکل انتقال غیر پیوسته یک الکترون از حالت اولیه به حالت برانگیخته یا برعکس می باشد که همراه با جذب یا نشر مقدار دقیقاً مشخصی انرژی است. کوچک ترین جزئی که توسط آن سیستم انرژی خود را تغییر می دهد کوانتم نام دارد.

لیزرها از انتقال الکترون بین حالت های مختلف انرژی ذرات (اتم ها، یون ها، ذراتی که مایعات، جامدات وگازها را تشکیل می دهند) استفاده می کنند. انتقال الکترون ها با تغییر سطح انرژی سیستم اتمی همراه می باشد.

ساده ترین سیستم کوانتم، سیستمی دارای دو سطح انرژی می باشد. دراین سیستم جذب و نشر پرتو بین دو سطح انرژی مجزا و مشخص صورت می گیرد (شکل ۲-۱). انتقال چنین سیستمی از یک سطح انرژی به سطح دیگر ممکن است به صورت تابش باشد، در این حالت جذب یا ساطع شدن انرژی به شکل تابش الکترومغناطیسی صورت می گیرد.



شکل ۲-۱- دیاگرام نشان دهنده جذب و نشر انرژی توسط a) یک اتم و b) مجموعه ای از اتم ها [۱]

[1] . Spontaneous emission
[2] . Stimulated emission

مطابق با رابطه پایه کوانتمی که توسـط بوهر[1] ارائه شد انتقال به صورت تابش از قانون زیر پیروی می کند:

$$h\nu = E_2 - E_1 = h\frac{c}{\lambda} \qquad (۱-۲)$$

در این رابطه $h\nu$ مقدار کوانتم تابش (فرو سرخ، مرئی، فرابنفش، اشعه ایکس،گاما)، $E_2 - E_1$ اختلاف سطح انرژی در انتقال کوانتمی رخ داده، h ثابت پلانک ($h=6/62517\times10^{-34}$ Js)، ν فرکانس تابش ساطع یا جذب شده بر حسب هرتز، λ طول موج تابش بر حسب میکرومتر و c سرعت نور در خلا می باشد ($c=2/988\times10^{8}$ m/s).

انتقال سیستم از سطح انرژی پایین تر به سطح انرژی بالاتر پس از جذب انرژی از یک منبع انرژی صورت می گیرد. هنگامی که یک سیستم، انتقال انرژی از سطح انرژی بالاتر به سطح انرژی پایین تر را انجام می دهـد، انرژی اضـافی به شـکل کوانتـم تابش (با مقـدار $h\nu$) ساطـع می شود. در یک الکترون برانگیخته با سطح انرژی بالاتر از حالت پایه، معمولاً تمایل طبیعی برای انتقال به حالت اولیه (حالت پایدار سیستم) وجود دارد. به طور طبیعی این انتقال همراه با ساطع شدن یک کوانتم تابش می باشد. این اثر تابش پیوسته[2] نامیده می شود.

در سیستمی با اتم های متفاوت (با تعداد الکترون های متفاوت با سطوح انرژی مختلف که به دور هسته اتمی می چرخند)، تغییر حالت اتم های بر انگیخته بهصورت اتفاقی می باشد. فوتون ها به صورت مستقل توسط ذرات ساطع می شوند و ذرات متفاوت پرتوهایی با فرکانس های متفاوت (با طول موج های متفاوت) ساطع می کنند. چنین پرتویی از نظر زمـانی وفضایی نامنـظم و غیر همسان[3] می باشد. طیف این تابش خاصیت پیوسته دارد.

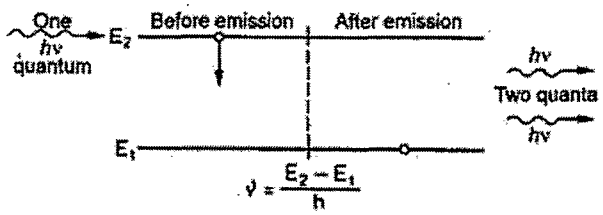
اما در لیزرها، تابش ساطع شده پیوسته نبوده و برانگیخته می باشد. در یک دسته از سیستم های اتمی که دربرابر تابش الکترومغناطیسی قرار می گیرند فرکانس توسط رابطه بوهر مشخص می شود و دو مکانیزم برای واکنش فوتون (کوانتم انرژی) با ذرات محتمل می باشد:

---

[1] . N. Bohr
[2] . Spontaneous emission
[3] . non-coherent

- اگرذرات در سطح انرژی پایین خود باشند آنگاه با جذب تابش به سطح انرژی بالاتر منتقل می شوند.

اگر ذرات در سطح انرژی بالاتراز سطح انرژی پایدار خود باشند (حالت برانگیخته)، در اثر تحریک خارجی (برخورد با فوتون) ذرات برانگیخته به حالت پایه (اولیه) خود باز می گردند. افت الکترون به سطح انرژی پایه (به مداری نزدیک تر به هسته)، فوتونی با انرژی مشابه $h\nu$ تولید می کند (شکل ۲-۲). این فرآیند تابش برانگیخته نامیده می شود و در ازای یک فوتون که به سیستم اتمی برانگیخته وارد می شود دو فوتون با انرژی یکسان (با فرکانس و طول موج برابر) از سیستم خارج می شوند و فرآیند تقویت تابش [1] رخ می دهد.



شکل ۲-۲- دیاگرام نشان دهنده ساطع شدن کوانتم های تابش- فوتونها [۱]

بنابراین در تابش پیوسته جهت، فرکانس و فاز تابش برابر نمی باشند اما در تابش برانگیخته این پارامترها برای تابش ایجاد کننده پرتو و پرتو برانگیخته ایجاد شده برابر خواهند بود. همچنین تابش فقط یک دسته از ذرات و اتم ها از خواص تابشی سیستم تک کوانتمی می باشد. این تابش دقیقاً در یک جهت با فرکانس برابر و فاز مشابه گسترش می یابد. چنین تابشی همسان [2] نامیده شده و تابش ساطع شده در اثر لیزر از این نوع می باشد [۱].

۲-۲ - عمل لیزر

برای ایجاد پرتو لیزر (یعنی برای نشر تابش همسان توسط سیستم کوانتم)، دو شرط می بایست برآورده شود:

[1] . amplified radiation
[2] . coherent

- تجمع معکوس[1] در سطوح انرژی
- ایجاد شرایط برای رخ دادن تشدید برانگیخته

۲-۲-۱- تجمع معکوس در سطوح انرژی

تجمع معکوس سطوح انرژی، شامل وارونه سازی ساختار سیستم کوانتمی در حالت تعادل ترمودینامیکی می باشد. در این ساختار جدید تعداد ذرات برانگیخته بیشتر می باشد زیرا تنها در این ساختار امکان ساطع شدن فوتون ها بیشتر ازجذب آنها می باشد و تقویت تابش اتفاق می افتد. این وارونه سازی به روش های زیادی می تواند انجام گیرد. اغلب برای این کار محیط فعال لیزری[2] را تحت تابش الکترومغناطیسی قرار می دهند. ایجاد تجمع معکوس در اثر جذب انرژی را پمپ کردن[3] می نامند. تجمع معکوس می تواند توسط پمپ کردن الکتریکی (شامل تخلیه الکتریکی درگازها)، بمباران الکترونی، به کاربردن جریان هادی درمواد نیمه هادی وغیره نیز انجام گیرد.

۲-۲-۲ - تشدید کننده نوری[4]

تشدید کننده نوری (تشدید کننده لیزری) محیط فعال لیزری را در برگرفته وتابش برانگیخته را با عبور متعدد این تابش از میان محیط فعال لیزری تقویت می کند. تشدید کننده نوری معمولاً از دو آینه عمود بر محور تشدیدکننده تشکیل شده است. انعکاس های متعدد پرتو از این آینه ها نه تنها در تمام مسیر با ذرات برانگیخته شده واکنش می دهد بلکه باعث افزایش تعداد آنها نیز می گردد.

عمل لیزر به شکل ساطع شدن تعداد بسیار زیادی فوتون فقط در امتداد محور تشدید کننده یا با یک انحراف بسیار جزئی و غیر مهم، صورت می گیرد زیرا تابش در جهات دیگر امکان تقویت مناسب به کمک تابش برانگیخته را ندارد و بنابراین محیط فعال لیزری را ترک می کند.

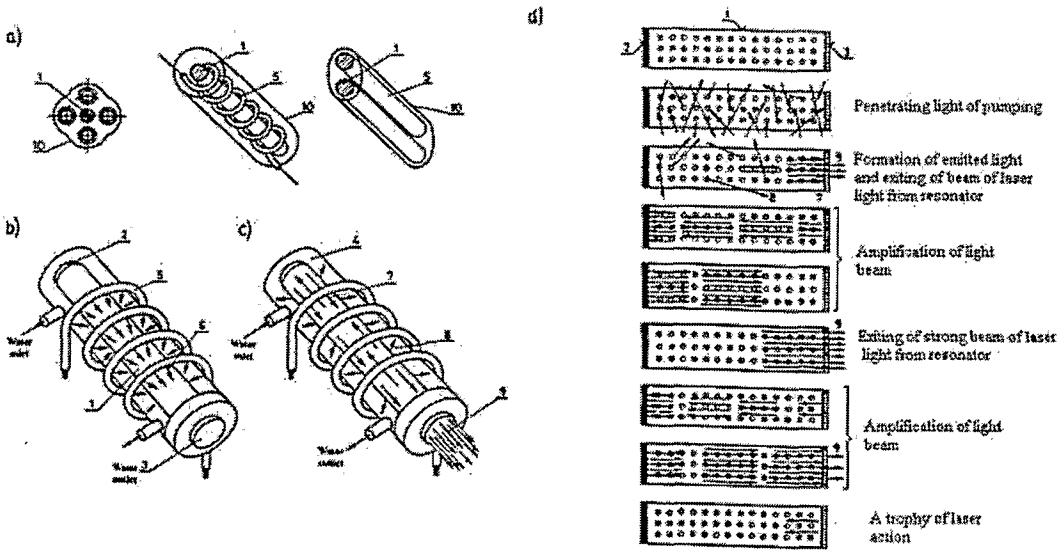
---

1. inversion of occupation
2. active medium
3. pumping
4. Optical resonator

خواص تشدید کننده های نوری اساساً بستگی به نوع آینه ها، هندسه آنها و فاصله بین آنها دارد و بسته به روشی که تابش لیزری تشدید کننده را ترک می کند تشدید کننده های پایا[1] و ناپایا[2] کاربرد پیدا کرده اند.

برای شرح عملیات لیزری از مثال کلاسیک لیزر یاقوت می توان استفاده کرد. شکل ۲-۳ طرحوارهٔ عملیات لیزری را نشان می دهد که به صورت زیر می باشد:

محیط فعال درکریستال یاقوت (سنگ کریستالی یاقوت Al_2O_3)، Cr_2O_3 رنگی می باشد که به میزان ۰/۰۵ درصد اضافه شده است. یون های کرم که تعداد آنها ۵۰۰۰ بار کمتر از سایر اتم ها می باشد برانگیخته می شوند. در یک میله یاقوت به قطر ۱۰ میلیمتر و طول ۱۰۰ میلیمتر تقریباً حدود $۱۰^{۱۹}$ اتم کرم وجود دارد. برانگیخته کردن یون های کرم توسط تابش نور آبی لامپ زنون[3]



شکل ۲-۳- طرحوارهٔ تولید پرتو لیزری در یک لیزر یاقوت a) سیستمهای پمپ کننده نوری مورد استفاده در لیزر یاقوت b) پمپ کردن محیط فعال c) عمل لیزر در میله یاقوت d) ایجاد پرتو لیزری در جهت محور افقی ۱- میله یاقوت که ذرات Cr_2O_3 به عنوان محیط فعال لیزری در آن می باشند ۲- آینه منعکس کننده (نفوذ ناپذیر) ۳- آینه نیمه نفوذپذیر ۴- خنک کننده ۵- لامپ زنون ۶- فوتون های لامپ زنون که به میله یاقوت نفوذ می کنند ۷- فوتونهای موازی با محور میله ۸- فوتونهایی که میله یاقوت (محیط فعال لیزر) را ترک می کنند ۹- پالس های پرتو لیزری ۱۰- سطح بازتابنده لامپ زنون [۱].

[1] . stable
[2] . unstable
[3] . Xenon photo flash

انجام می شود. این لامپ به صورت لوله دور میله یاقوت و یا به صورت موازی با میله یـاقوت قـرار می گیرد. میله یاقوت همراه با آینه ها عمل تشدید را انجام می دهند. بخـشی از تـوان تـابش توسـط اثرات سطحی کاهش می یابد، اما توان تابش درون میله یاقوت در اثر حرکت مـــوازی فوتـون هـا وایجاد فوتون های مشابه از یـون هـای تحریـک شـده کـرم و تقویـت بـسیار زیـاد تـابش افـزایش می یابد. در انتهای محیط لیزری دو آینه قرار دارد، یکی ا ز دو آینه نفوذ ناپـذیر[1] مـی باشـد و پرتـو را کاملاً منعکس می کند. آینه دیگر کمی نفوذ پذیر [2] می باشد. برخورد پرتو بـه آینـه اول باعـث انعکاس کامل آن به سمت آینه نیمه نفوذ پذیر می شود، در مسیر عبوری توان پرتو در اثر عبـور از محیط فعال لیزری وآزاد شـدن پیـاپی فوتـون هـا افـزایش مـی یابـد، پـس از رسـیدن بـه آینـه نیمـه نفوذپذیر بخشی ازپرتوها از لیزر خارج و مابقی دوباره منعکس می گردند و از درون میله یاقـــوت عبـور کرده و ایـن عمل مجـدداً ادامه می یابد. پس از تعدادی عبور پیاپی تـوان کـاهش مـی یابـد زیرا تعداد اتم های برانگیخته به طور مداوم کاهش مـی یابـد. بنـابراین فرآینـد تکـرار مـی شـود و تابش مجدد توسط لامپ زنون اتم های کرم را تهییج می کند. در نتیجه لیزر پالس هایی همـسان، تک رنگ، با طول موجی برابر با طول موج تابش اولیه توسط لامپ، ایجاد می کند.

۲-۲-۳- لیزرهای حالت جامد Nd-YAG

طراحی لیزرهای Nd-YAG بسیار شـبیه لیـزر یـاقوت مـی باشـد. در ایـن لیزرهـا محـیط فعـال، از $Y_3Al_5O_{12}$ ساخته شده است که توسط یون های سه ظرفیتی نئودیم Nd^{3+} فعال شده و عمل پمـپ کردن توسط لامپ کریپتونی انجام می گیرد. از این لیزرها به دو صورت پالسی و پیوسته مـی تـوان استفاده کرد اما به طور معمول این لیزرها به صورت پالسی و با طول موج ۱/۰۶ میکرومتـر اسـتفاده می شـوند. در حالت پالـسی از طول پالـس های نانو ثانیه تـا میلـی ثانیـه و فرکـانس هـای ۱ تـا ۲۵ هرتز استفاده می شود.

---

[1] . impermeable
[2] . partially permeable