



دیود ایزر چیست — معرفی ساختار و کاربرد

جلسه ۲۹



فهرست مطالب

۱. مقدمه

۲. لیزر چیست؟

۳. ویژگی‌های پرتو لیزر

۴. لیزر چگونه کار می‌کند؟

۵. برای ساخت یک لیزر به چه چیزهایی نیاز داریم؟

۶. تابش خود به خودی

۷. تابش القایی

۸. چرا نور لیزر، تک رنگ (تک فرکانس) و هم‌دوس است؟

۹. دیود لیزر

مقدمه

❖ امروزه کلمه لیزر را در خیلی جاها می‌شنویم. از نشانگرها (Pointer) در جلسات ارائه گرفته تا چاپگرهای لیزری، کلینیک‌های زیبایی و کاربردهای پزشکی، مخابرات نوری، برش فلزات در صنعت، اسلحه‌های لیزری و ... همه کاربردهایی از لیزر هستند.

❖ عملکرد یک لیزر چگونه است؟

❖ فیزیک لیزر چیست؟

❖ تفاوت لیزر با نور معمولی چیست؟

❖ مکانیسم حاکم بر دیودهای لیزری چیست؟

❖ پاسخهای فوق را در این جلسه دنبال خواهیم کرد.

❖ ابتدا به معرفی فیزیک حاکم بر نور لیزر پرداخته و در ادامه دیودهای لیزری را مورد بحث قرار خواهیم داد.

لیزر چیست؟

❖ با اینکه احتمالاً می‌دانید ماهیت لیزر و نور معمولی، یکسان و هر دو موجی الکترومغناطیسی (شامل بسته‌های انرژی به اسم فوتون) هستند؛ اما یک لیزر می‌تواند از نور معمولی یک لامپ بزرگ یا حتی نور حاصل از فلش عکاسی در شب قوی‌تر باشد. شاید مثال زیر برای درک شهودی از تفاوت لیزر و نور معمولی مناسب باشد.

❖ فرض کنید که در وان حمام، دست خود را به صورت رفت و برگشت حرکت داده و یک موج تولید می‌کنید. احتمالاً بتوانید با افزایش سرعت و تکرار این کار موجی قدرتمندتر را تولید کنید. حال اگر می‌توانستید این کار را میلیون‌ها بار در اقیانوسی بزرگ انجام دهید چه اتفاقی می‌افتاد؟! می‌توان گفت که یک لیزر کاری مشابه فوق را با امواج نوری انجام می‌دهد. در واقع تقویت نور در یک لیزر، با نور ضعیفی آغاز و طی چندین بار حرکت رفت و برگشتی در محیطی موسوم به کاواک، بر انرژی آن افزوده و تقویت می‌شود.

ویژگی‌های پرتو لیزر

❖ احتمالاً بارها نشانگرهای لیزری (Pointer) را در دست گرفته‌اید. با نگاه دقیق‌تری به آن متوجه سه تفاوت اصلی آن با نور معمولی حاصل از یک لامپ می‌شوید:

❖ نور معمولی حاصل از یک لامپ شامل همه رنگ‌ها (همه فرکانس‌های مرئی)، به اصطلاح نور سفید است. اما نور حاصل از لیزر، پهنای فرکانسی کمتری داشته و در شرایط ایده‌آل می‌تواند نوری «تک‌رنگ» (Monochromatic) تولید کند.

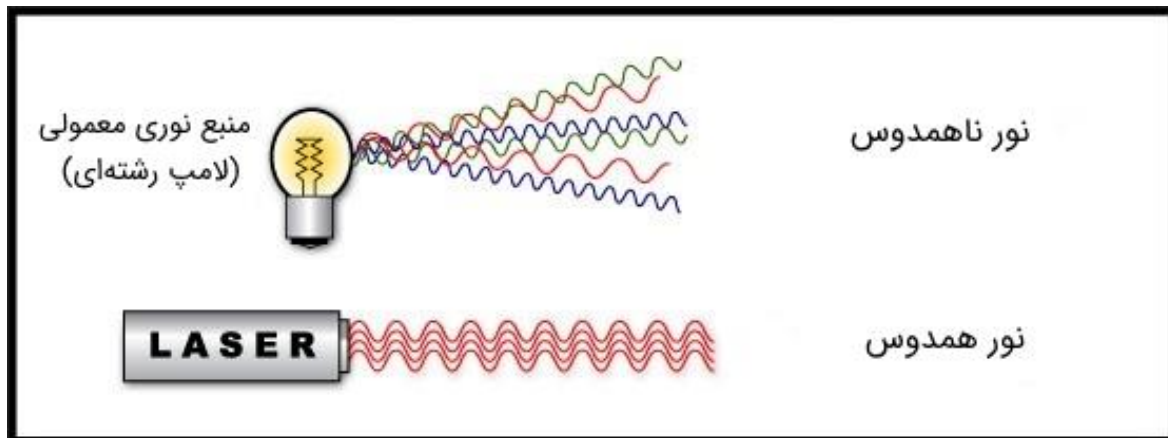
❖ برای مثال یک لیزر می‌تواند پرتویی با رنگ‌های مختلف، اغلب سبز و قرمز و یا حتی بی‌رنگ در فرکانس‌های مادون قرمز و فرابنفش و ایکس (X) تولید کند.

❖ نور حاصل از یک لامپ در همه جهات پخش می‌شود؛ حتی با استفاده از لنز یا بازتاب‌دهنده‌ها در چراغ‌قوه‌ها نور آن مسیری مخروطی و در نهایت پخش (واگرا) می‌شود. در حالی که نور حاصل از یک لیزر، پرتویی باریک بوده که به دلیل واگرایی خیلی کم مسیر طولانی‌تری نسبت به نور عادی طی می‌کند. این مفهوم به «همدوسی» (Coherence) طولی معروف است.⁶

❖ یک لامپ، پرتوهایی در فازهای مختلف تولید می‌کند. در واقع فاز هر پرتو یا به طور دقیق‌تر هر فوتون تابشی، در هر زمان متفاوت بوده و هیچ نظم خاصی در آن‌ها وجود ندارد. این در صورتی است که پرتوهای حاصل از یک لیزر همگی هم‌فاز بوده و در یک زمان مشخص همگی باهم به بیشینه و دامنه خود می‌رسند. این امر به همدوسی زمانی معروف است.

❖ پرتو حاصل از لیزر را می‌توان مثل رژه منظم سربازان ارتش که همگی در یک ردیف و پشت سرهم با حرکات یکسان راه می‌روند، تشبیه کرد. در حالی که نور حاصل از یک لامپ مثل پیاده‌شدن مسافران قطار است که همگی به صورت غیرمنظم به سمت درب‌های خروجی هجوم می‌آورند.

❖ سه عامل ذکر شده فوق یعنی تک فرکانس بودن و همچنین همدوسی طولی و زمانی تفاوت اصلی پرتو لیزری و پرتو معمولی حاصل از یک لامپ است.



لیزر چگونه کار می کند؟

❖ برای اینکه درک بهتری از چگونگی عملکرد و نحوه ساخت یک لیزر داشته باشیم، نیاز است تا با مبحث تابش های اتمی آشنا شوید. به طور خلاصه یک الکترون در مدارهای انرژی اطراف هسته، با جذب انرژی به ترازهای بالاتر می رود. این الکترون در ترازهای بالایی پایدار نبوده و تمایل دارد به یک حالت پایدار برود. در نتیجه انرژی اضافی خود را به صورت فوتون، تابش کرده و خود به ترازهای پایین تر می رود. فرکانس یا طول موج فوتون تابش شده به اختلاف انرژی دو تراز بستگی دارد.

❖ حال فرض کنید تعداد زیادی از این الکترون های ناپایدار با انرژی زیاد، یکباره همگی (تحت کنترل ما) به تراز با انرژی پایین تر رفته و تابش کنند؛ با تقویت این تابش در محیط کاواک، نور پر قدرت لیزر تولید و توسط لنزهایی به بیرون هدایت می شود.

برای ساخت یک لیزر به چه چیزهایی نیاز داریم؟

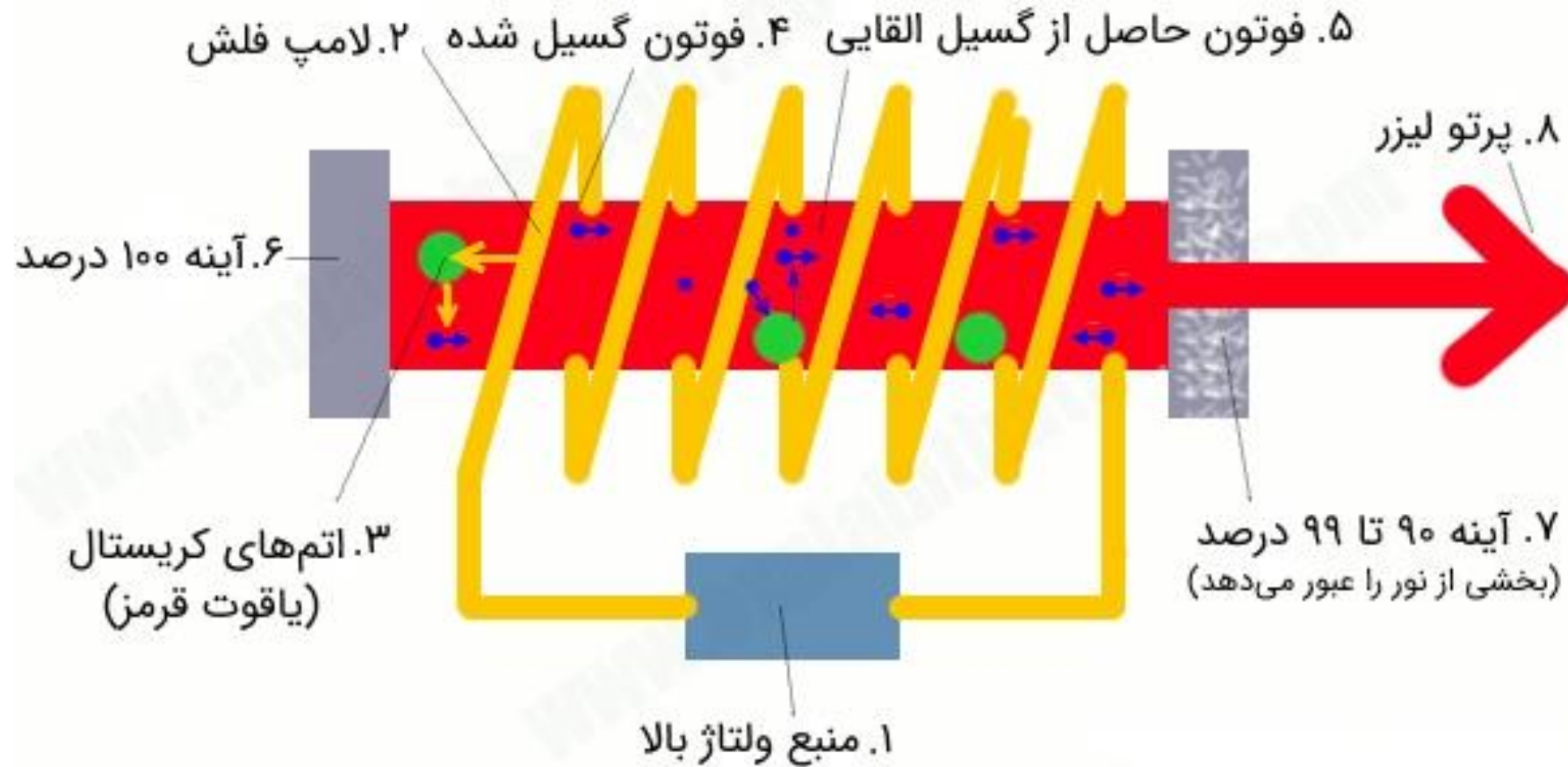
❖ برای این کار به دو قسمت مهم و پایه‌ای که اساس کار لیزر در آن‌ها نهفته است، نیاز داریم:

❖ محیط (ماده) فعال یا «محیط بهره» (Gain Medium)؛ منظور محیطی است که الکترون‌های اتم‌های آن را برانگیخته می‌کنیم تا به ترازهای بالاتری روند. این محیط بسته به کاربرد و نوع لیزر می‌تواند به صورت جامد، مایع و گاز باشد.

❖ ابزار یا سیستمی که با آن اتم‌های محیط بهره را تحریک و در واقع الکترون‌های آن را برانگیخته کنیم. به طور مثال می‌توان به یک لامپ فلش زئون پر قدرت، تخلیه الکتریکی (ولتاژ بالا) در یک محیط بهره گازی یا یک لیزر دیگر اشاره کرد.

❖ در ادامه با یک مثال روند ساخت و چگونگی عملکرد یک لیزر معمولی با نور قرمز را شرح می‌دهیم. محیط فعال این لیزر حالت جامد، کریستال یاقوت قرمز (Ruby) بوده که توسط لامپ فلش احاطه شده است (شکل ۳).

❖ توجه شود که کلیت و اساس کار همه لیزرها به طریق زیر است.



شکل (۳): شماتیکی از یک لیزر حالت جامد (محیط بهره یاقوت قرمز)

مطابق با شکل فوق، عملکرد لیزر را می‌توانیم به صورت زیر تشریح کنیم:

۱- با برقراری جریان الکتریکی، منبع ولتاژ بالا انرژی لازم برای روشن شدن لامپ فلش را فراهم می‌کند.

۲- با خاموش و روشن شدن منبع ولتاژ بالا به طور متناوب و در نتیجه روشن و خاموش شدن لامپ فلش، انرژی لازم جهت برانگیخته شدن اتم‌های محیط فعال یا بهره‌فراهم می‌شود. این انرژی، توسط فوتون تابش شده از لامپ فلش به اتم‌های کریستال یاقوت قرمز منتقل می‌شود.

۳- اتم‌های کریستال یاقوت قرمز (کره‌های سبز رنگ) فوتون‌های تابش شده از لامپ فلش را جذب و در نتیجه الکترون‌هایشان به ترازهای بالاتر گذار می‌کنند. این الکترون‌ها تمایل به پایداری و رفتن به حالت پایه (Ground State) را دارند که این کار را با تابش فوتون (کره‌های کوچک آبی) در عرض چند میلی ثانیه انجام می‌دهند. این امر به «گسیل خودبه‌خودی» (Spontaneous Emission) معروف است.

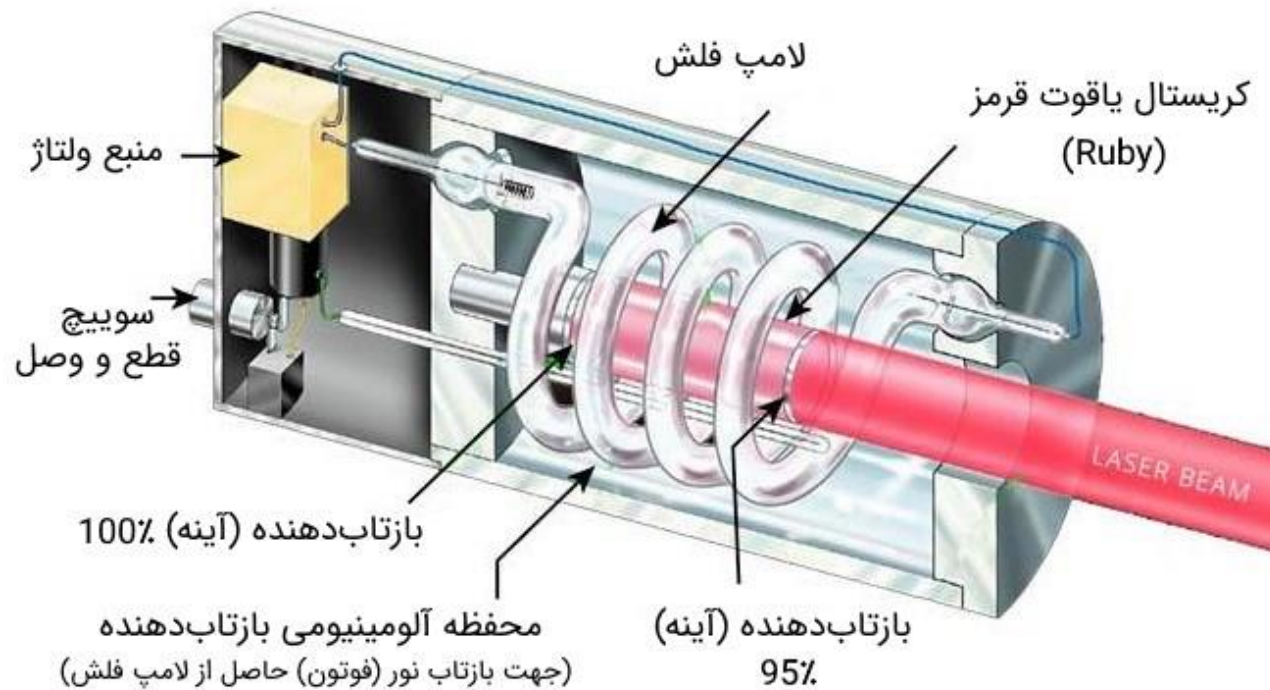
۴- فوتون‌های گسیل شده در داخل ساختار کریستال روبی (محیط بهره) با سرعت نور حرکت می‌کنند.

۵- فوتون‌های موجود در سیستم (حاصل از لامپ فلش یا گسیل خودبه‌خودی) می‌توانند با اتم‌های برانگیخته نیز برخورد کنند. در این صورت الکترون‌ها انرژی خود را به صورت فوتونی آزاد کرده و به ترازی با انرژی پایین‌تر می‌روند. در این حالت می‌توان گفت که یک فوتون باعث تولید فوتون دیگری شده است که به آن «گسیل القایی» (Stimulated Emission) می‌گویند. در واقع نور تقویت شده (Light Amplification) حاصل از فرآیند تابش گسیل القایی (Stimulated Emission of Radiation) نور لیزر را تشکیل می‌دهد. کلمه «لیزر» (LASER) با کنار هم گذاشتن حرف اول دو عبارت فوق حاصل می‌شود. (Light Amplification Stimulated Emission of Radiation)

۶- نور تولید شده در قسمت پنجم نیاز به تقویت بیشتری دارد. این کار را با قرار دادن دو بازتابنده ابتدا و انتهای محیط فعال انجام می‌دهند. در واقع به مجموعه این سیستم کاواک می‌گویند که در آن فوتون‌ها با حرکت رفت و برگشت و بازتاب از بازتابنده‌ها تقویت می‌شوند. از آنجا که واژه آینه بیشتر تداعی کننده بازتاب نور مرئی است و از آنجا که یک لیزر ممکن است در فرکانس‌های مادون قرمز، فرابنفش یا حتی اشعه ایکس کار کند، بهتر است که از کلمه بازتابنده به جای آینه استفاده کنیم. چرا که پدیده جذب و بازتاب تابعی از ضریب شکست و در نتیجه تابعی از طول موج است. شماره ۶ در شکل (۳) بیانگر بازتابنده (آینه) ۱۰۰ درصد (تمام نور را بازتاب می‌کند) است.

۷- برای اینکه نور تقویت شده حاصل از فرآیند گسیل القایی بتواند از کاواک خارج شود، نیاز است تا یکی از بازتابنده‌ها به مقدار جزئی نور را عبور دهد. معمولاً استفاده از بازتابنده (آینه) های ۹۹~۹۰ درصد برای این امر مناسب است.

۸- نور عبور و خارج شده از بازتابنده جزئی می‌تواند توسط ادوات اپتیکی مناسب مثل لنزها به محیط خارج هدایت یا به یک فیبر نوری مناسب کوپل شود.



شکل (۴): نمایی واضح‌تر از ساختار یک لیزر یاقوت قرمز.

در ادامه دو بحث تابش خودبه‌خودی و القایی را بیشتر بررسی می‌کنیم.

تابش خود به خودی

❖ تابش‌های لیزری، همانند تابش‌های هسته‌ای و رادیواکتیو خطرناک نیستند. البته از لحاظ توان می‌توانند برای چشم خطرناک و یا باعث سوختگی پوستی شوند. همانطور که پیشتر گفته شد، ماهیت تابش لیزری، تابش فوتون از الکترون‌های برانگیخته است و ارتباطی به هسته اتمی (پروتون و نوترون) ندارد. تابش لیزر، موجی الکترومغناطیسی بوده که بسته به فرکانسش در طیف الکترومغناطیسی همانند اشعه ایکس، فرابنفش، مرئی و مادون قرمز جای می‌گیرد.

❖ به طور کلی سازوکار تابش خودبه‌خودی در تمامی منابع نوری مثل شمع، لامپ و سایر منابع نوری معمولی دخیل است. الکترون‌های یک جسم تحت تابش امواج، در واقع در برخورد با فوتون‌ها یا با افزایش دما و جذب انرژی گرمایی، انرژی‌شان زیاد شده و به ترازهایی با انرژی بالاتر می‌روند. از آنجا که این وضعیت جدید ناپایدار است، الکترون‌ها تمایل دارند که انرژی‌شان را به صورت تابش فوتون از دست داده و به ترازهایی با انرژی کمتر گذار کنند. این اتفاق در مدت زمان خیلی کوتاهی رخ می‌دهد.

❖ در فرآیند تابش خودبه‌خودی، فوتون‌های حاصل از یک منبع نوری معمولی با یکدیگر از حیث فرکانس و فاز متفاوت‌اند.

❖ دلیل این امر گذارهای متفاوت الکترون‌ها به ترازهای مختلف است. لذا نور حاصل را «سفید»، یعنی نوری شامل همه

فرکانس‌ها می‌نامند. همچنین نور تابش شده جهت خاصی نداشته و به صورت تصادفی در همه جهات منتشر می‌شود.



شکل (۵): تابش یک لامپ معمولی بر اساس مکانیزم «تابش خودبه‌خودی» است.

❖ اکثر اتم‌های یک محیط، تعداد الکترون‌های بیشتری در حالت پایه نسبت به حالت برانگیخته دارند. دلیل اینکه در شرایط عادی مواد تابش خودبه‌خودی ندارند (البته در ناحیه مرئی) نیز همین است.

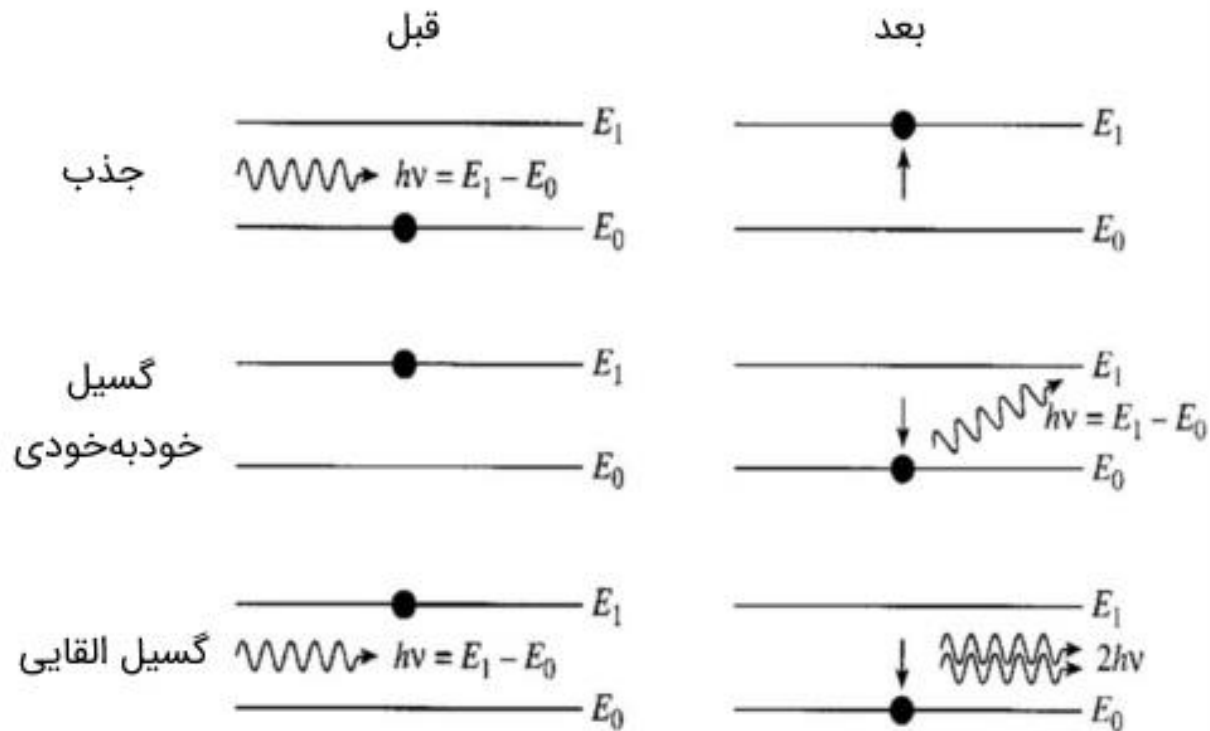
❖ حال فرض کنید که بتوانیم با اعمال انرژی کافی (اصطلاحاً پمپ کردن انرژی) الکترون‌ها را به تراز برانگیخته ببریم. در این حالت تعداد جمعیت الکترون‌های برانگیخته نسبت به الکترون‌های حالت پایه بیشتر می‌شود. به این حالت «وارونی جمعیت» (Population Inversion) می‌گویند.

❖ حال فرض کنید که مقدار انرژی به قدری باشد که بتوانیم این الکترون‌های برانگیخته را قبل از تابش خودبه‌خودی و برگشت به حالت پایه یا ترازهایی با انرژی کمتر، برای مدتی در آن حالت برانگیخته نگه داریم. اصطلاحاً به این تراز «شبه پایدار» (Meta-Stable State) می‌گویند.

❖ حال اگر فوتونی که انرژی برابر با اختلاف انرژی دو تراز برانگیخته و پایه باشد به محیط فعال (محیط بهره) بتابد و با الکترون برخورد کند، باعث می‌شود که الکترون فوتونی با همان انرژی تابش و به حالت پایه باز گردد. به این امر تابش القایی می‌گویند.¹⁶

❖ در این صورت دو فوتون (یکی فوتون اولیه تابش شده و دومی فوتون تابش شده از الکترون) در محیط داریم که در واقع نور تقویت شده محسوب می‌شود (شکل ۶).

❖ هر کدام از این فوتون‌ها می‌توانند با برخورد به دیگر الکترون‌های برانگیخته فوتون دیگری تولید کنند. در انتهای این امر تعداد زیادی از فوتون‌های هم‌فرکانس داریم که در داخل کاواک پرشدت‌تر شده و باریکه پرنرژی و همدوس لیزر با پهنای فرکانسی کم را تشکیل می‌دهند.



شکل (۶): شماتیکی از فرآیندهای جذب، گسیل خودبه‌خودی و گسیل القایی

چرا نور لیزر، تک رنگ (تک فرکانس) و همدوس است؟

❖ پاسخ این سوال در قسمت قبل، یعنی تابش القایی نهفته است. اگر با ساختار و ترازهای اتمی آشنا باشید (مدل بور)، می‌دانید که انرژی ترازهای اتمی به صورت گسسته تغییر می‌کند. در واقع انرژی ترازها متغیری کوانتیده است.

❖ فرض کنید که می‌خواهیم لیزری طراحی و بسازیم که در طول موج یا فرکانسی خاص کار کند (انتخاب محیط فعال (بهره) مناسب، امری مهم است). در واقع الکترون‌های برانگیخته محیط فعال (بهره) باید تابشی در طول موج مد نظر ما داشته باشند. از آنجا که ترازهای انرژی کوانتیده بوده و الکترون‌ها فقط به ترازهایی خاص می‌توانند گذار کنند، باید انرژی برابر با اختلاف انرژی دو تراز، یعنی اختلاف انرژی تراز که در آن قرار دارد و تراز که قرار است به آن گذار کند، به آن بدهیم. این امر بیانگر این است که هیچ الکترونی وجود ندارد که انرژی‌اش مقداری بین دو تراز باشد.

❖ همان‌طور که پیشتر گفته شد، مطابق شکل (۶) انرژی لازم برای برانگیخته کردن الکترون و گذار آن به تراز مد نظر را توسط فوتونی با مقدار انرژی $(h_f = E_1 - E_0)$ فراهم می‌کنیم. اگر مقدار این انرژی بیشتر یا کمتر از مقدار $(h_f = E_1 - E_0)$ باشد، الکترون سر جای خود می‌ماند.

❖ الکترون برانگیخته شده که در تراز شبه پایدار قرار گرفته ناپایدار بوده و تمایل دارد با تابش فوتونی به تراز با انرژی پایین تر گذار کند. جرقه این کار توسط فوتونی با همان مقدار انرژی ($h_f = E_1 - E_0$) زده می شود. در این صورت الکترون با تابش فوتونی با انرژی (فرکانس) برابر با فوتون اولیه به تراز پایین تر رفته و در نتیجه تکرار این فرآیندها، نور حاصل از تابش القایی، تقویت می شود.

❖ پاسخ این که چرا لیزر در فرکانسی خاص کار می کند، همین امر است. در واقع فقط تابش هایی تقویت می شوند که فرکانس متناظر با اختلاف انرژی دو تراز داشته باشند.

❖ پس به طور خلاصه فرآیند گسیل القایی که مکانیزم اصلی عملکرد یک لیزر است، باعث ایجاد تعداد خیلی زیادی از فوتون های هم فرکانس و هم فاز (همدوس) می شود که در نهایت این فوتون ها در محیط کاواک تقویت و توسط ادوات اپتیکی مناسب به بیرون هدایت می شوند.

❖ لازم به ذکر است که هر پرتو یا پالس لیزر به هر حال کمی پهنای فرکانسی دارد که این امر ناشی از گذارهای الکترون به زیرلایه های (عدد کوانتومی فرعی /) مختلف از یک تراز است.

دیود لیزر

❖ در بخش قبل با فیزیک و اصول کارکرد لیزرها آشنا شدیم.

❖ همانطور که می‌دانید لیزرهای حالت جامد یکی از پرکاربردترین نوع لیزرها در صنعت، تکنولوژی و علوم پزشکی هستند.

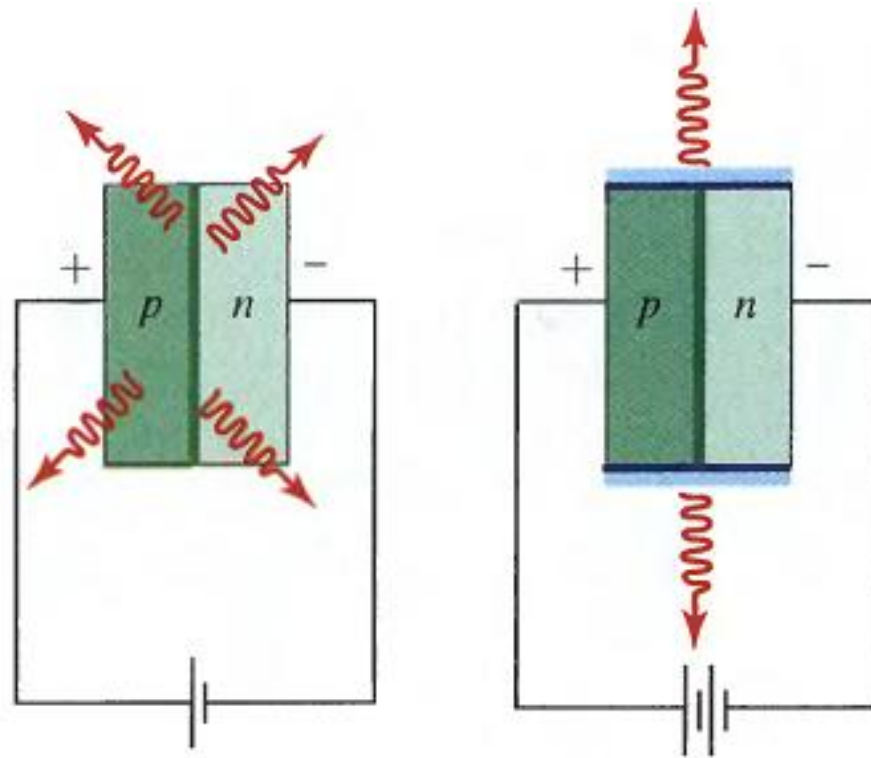
❖ در این بخش قصد داریم تا با زبانی ساده به معرفی لیزرهای دیودی حالت جامد نیمه رسانا (Semiconductor Diode Lasers) بپردازیم.

لیزر نیمه رسانا

❖ همانطور که در مقدمه بیان شد، ما بارها در طول روز از لیزرهای نیمه رسانا که به دیود لیزر معروف هستند، بدون آگاهی از ماهیت آنها استفاده کرده‌ایم. به عنوان مثال بدون دیود لیزر ها قادر به بهره‌گیری از سرویس‌های مخابراتی بر بستر فیبر نوری نبودیم، نمی‌توانستیم اطلاعات را روی یک DVD رایت کنیم یا چاپ برگه‌ها توسط پرینترهای پر سرعت لیزری امکان‌پذیر نبود.

❖ دیود لیزرهای نیمه رسانا (به اختصار دیود لیزر) همانند سایر لیزرها، فیزیک و مکانیزم مشابهی دارند؛ با این تفاوت که ماده فعال (محیط بهره - Gain Medium) درون آنها نیمه رسانای حالت جامد (پیوند p-n) است.

❖ یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این نوع از لیزرها، اندازه کوچک آنها است که باعث کاربردهای فراوانی در تکنولوژی و صنعت شده است. می‌توان گفت دیود لیزر ها از نظر مقیاس، در حد و اندازه LED ها هستند. در شکل زیر تفاوت این دو نمایش داده شده است.



شکل (۲): مقایسه‌ای کیفی میان LED که نور را در تمامی جهات منتشر می‌کند و لیزر دیود که به دلیل استفاده از کاواک، نور تقویت شده و می‌تواند به یک سمت هدایت شود.²¹

دیود لیزر چگونه کار می‌کند؟

❖ همان‌طور که بیان کردیم مکانیزم عملکرد دیود لیزر ها همانند LED ها است.

❖ برای تولید نوری با مشخصات پرتو لیزری نیاز است که تغییراتی را در یک دیود LED پیوند p-n ایجاد کنیم.

❖ در دیود لیزر ها غالباً به جای نیمه هادی سیلیکون، از ترکیب آلایژ آلومینیوم (aluminum) و گالیم آرسنید (gallium arsenide) یا ایندیوم گالیوم آرسنید فسفرید (indium gallium arsenide phosphide) استفاده می‌کنند.

❖ با اتصال جریان الکتریکی به دیود مذکور و عبور الکترون‌ها از سد پتانسیل p-n و ترکیب آن‌ها با حفره‌ها، انرژی اضافه الکترون‌ها در قالب فوتون منتشر می‌شود. همچنین تعامل الکترون - فوتون نیز به تولید فوتون‌های بیشتر کمک می‌کند.

❖ روند فوق (تبدیل انرژی الکترون‌های وارد شده به فوتون‌های خروجی) مشابه با فرآیند گسیل القایی (Stimulated Emission) در سایر لیزرها است که قبلاً به آن پرداخته شد.

فیلم «چند آزمایش جذاب با نور لیزر»

