درسنامه

درسنامهٔ آشنایی با لیزر، دیودهای نورگسیل و کاربرد آن‌ها

روح‌اله خلیلی بروجنی
www.avang.org

چکیده

لیزرها پس از اختراعشان از اواخر سال‌های ۱۹۵۰ استفاده‌های بی‌شماری یافته‌اند؛ از برش فلزات و پاک کردن سرخرگ‌های انسان تا نقشه‌برداری زمین زراعی و پخش CD ها و DVDها. لیزرها با ادغام فیزیک کوانتومی و فیزیک نور، نوع جدیدی از نور در اختیار گذاشته‌اند. این نور با نوری که از لامپ‌های التهابی و فلوئورسان حاصل می‌شود تفاوتی بارز دارد و همین امر سبب شده است که لیزرها کاربردهای مفید زیادی داشته باشند. در این درس‌نامه، با طبیعت نور لیزر و راه‌های تولید آن آشنا خواهیم شد. افزون بر این دیودهای نورگسیل (LEDها) و لیزرهای دیودی را نیز بررسی می‌کنیم.

کلیدواژه‌ها: لیزر، دیودهای نورگسیل، فیزیک کوانتومی، فوتون، گسیل خودبه‌خود، نور همدوس، محیط لیزری، نیمرسانا

پرسش‌هایی برای اندیشیدن: چرا نور لیزر معمولاً رنگ درخشانی دارد؟ چرا نور لیزر اغلب به‌صورت باریکه‌ای نازک است؟ در سینما «لیزرها» را اغلب با گسیل رگه‌هایی روشن نشان می‌دهند که اگر شخص با سرعت کافی بپرد می‌تواند از آن اجتناب کند؛ آیا این منظره واقعی است؟

آزمایش‌هایی برای انجام دادن: لیزرهایی که در دستگاه‌های پخش CD یا DVD و چاپگرهای لیزری وجود دارند نسبتاً دور از دسترس‌اند. اگر یک چاپگر لیزری ندارید به روبشگر بارکد مغازه‌ها نگاه کنید. این دستگاه روبشی شامل یک لیزر گازی یا حالت جامد است که باریکهٔ بسیار نازکی را به‌صورت نوارهای باریک روی هر چیزی که از روبشگر بگذرد می‌اندازد. یک حسگر نوری در دریچه، گوش به زنگ این حرکت باریکهٔ نوری است تا در سرتاسر برچسب حرکت کند. اگر به نور لیزر گسیل شده از دریچهٔ روبشگر نگاه کنید یا لکهٔ یک لیزر نشانگر را روی دیوار مشاهده کنید هم خالص بودن رنگ آن و هم ویژگی لکه‌ای عجیب آن را خواهید دید؛ نور به‌صورت لکه‌های روشن و تاریک ظریفی به‌نظر می‌رسد. این لکه‌ها ناشی از اثرهای تداخلی‌اند که در نور منظم شدهٔ لیزر کاملاً مشخص‌اند. این نور همچنین به‌طور نامتداولی درخشان به‌نظر می‌رسد و مثل وقتی که به خورشید نگاه می‌کنید باید برای اجتناب از آسیب دیدن چشم، از خیره شدن به آن خودداری کنید.

هشدار

نور لیزر خطرناک است. چون نور لیزر می‌تواند فوق‌العاده درخشان و بسیار متمرکز باشد، به چشم آسیب جدی می‌زند. باریکهٔ لیزر پس از ورود به چشم در ناحیهٔ کوچکی روی شبکیه متمرکز می‌شود و آسیب دائمی تولید می‌کند؛ اگرچه لیزرهای تا ردهٔ III برای چشم نسبتاً ایمن هستند. این موضوع ناشی از واکنش سریع پلک زدن طبیعی برای محافظت شماست. اما هرگز نباید به هیچ لیزری خیره شوید. ردهٔ IV لیزرها برای چشم ایمن نیستند و نور آن‌ها هرگز نباید وارد چشم‌های شما شود.

لیزرها و نور لیزر

برای شناخت لیزرها، باید بدانید که نور لیزر چه تفاوت‌هایی با نور معمولی گسیلیده از اجسام داغ یا اتم‌های منفرد در یک تخلیهٔ الکتریکی دارد. هر ذرهٔ نور معمولی و هر فوتون، خواهی نخواهی بدون هیچ‌گونه ارتباط با دیگر ذرات مجاور گسیل می‌شود. به واسطهٔ این ویژگی مستقل و پیش‌بینی نشده است که آن را نور **خودبه‌خود** می‌نامند و به‌وجود آمدن آن **گسیل خودبه‌خود تابش** نامیده می‌شود.

کارهای نظری آلبرت اینشتین و دیگران در سال‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ وجود نوع دیگری از نور، یعنی **نور القایی** را پیش‌بینی کرد که وقتی به‌وجود می‌آید که اتم برانگیخته یا دستگاهی اتم‌گونه فوتون عبوری را تکرار کند. اگرچه این **گسیل القایی تابش** فقط وقتی به وقوع می‌پیوندد که اتم برانگیخته قابلیت گسیل خودبه‌خود فوتون تولید شده را داشته باشد، نسخه‌ای

که تولیدشـده چنان کامل اسـت که دو فوتـون کاملاً غیرقابل تشـخیص‌اند. این دو فوتون با هم یک موج الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند.

بـرای اینکه از چگونگی وقوع چنیـن القایی تصویر بهتری به‌دسـت آید، یک اتم منـزوی را در حالتـی برانگیخته در نظر بگیرید. این اتم سرانجام به‌حالت پایهٔ خود برمی‌گردد، ولی برای چنین اتفاقی باید تعداد بیشتری فوتون گسیل کند. اتم در حالت برانگیخته منتظر می‌ماند تا گذار تابشی خودبه‌خود شروع شود. در ایـن گذار، یکـی از الکترون‌های اتم به پس و پیش شـتاب می‌گیرد و اتم یک فوتون گسیل می‌کند.

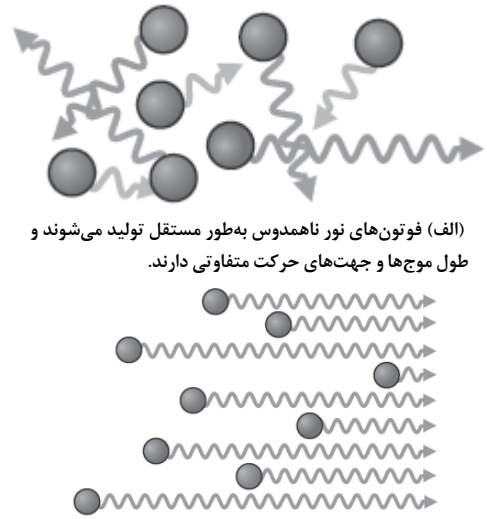
اگر هنگام انتظار اتم در حالت برانگیخته فوتون مشابهی از آن بگذرد، میدان الکتریکی آن فوتون می‌تواند فرایند گذار تابشی آن را با ارتعاشی همنوا القا کند. این میدان با کشیدن و فشار دادن الکترون‌های اتم، آن‌ها را به پس و پیش شـتاب می‌دهد. اگرچه این اثر کوچک اسـت، ولی می‌تواند برای شروع گسیل نور کافی باشـد. اگر اتم نور گسـیل کند، فوتونی که تولید می‌کند نسخهٔ کاملی از فوتون القایی است.

وقتی ابتدا فرایند گسـیل برانگیخته کشـف شد بی‌درنگ معلوم شـد که این فرایند تقویت نور را امکان‌پذیر می‌سازد. اگر بتوان سامانه‌های برانگیختهٔ کافی را کنار هم قرار داد، عبور یک تک‌فوتون را می‌توان بارها و بارها دقیقاً تکثیر کرد. پس به‌زودی به‌جای یک تک‌ذرهٔ نور، هزاران، میلیون‌ها، یا حتی میلیاردها ذرهٔ نور مشابه خواهید داشت.

امـا تحقق این ایـده باید تا اواخر سـال‌های ۱۹۵۰ منتظر می‌ماند تا جزئیات فنی چگونگی دسـتیابی واقعی به تقویت نور فراهم آید. در سـال ۱۹۶۰، اولین نوسـانگرهای لیزری ساخته شـدند. این‌ها وسـایلی بودند که باریکه‌های شـدید نور گسیل می‌کردنـد که در آن‌ها تمام ذره‌های نور مانند هم بودند. هر ذرهٔ نور در فرایند القا به نسخه‌های بی‌شماری تکثیر شده بود.

وقتـی تک‌تک اتم‌ها یا سـامانه‌های اتم‌گونهٔ برانگیخته، در گسیل خودبه‌خود، نور گسیل می‌کنند ذرات نور به‌صورت تعداد زیادی امواج الکترومغناطیسی مستقل بیرون می‌آیند (شکل ۱- الف). نور متشکل از تعداد زیادی امواج الکترومغناطیسی مستقل را نور **ناهمدوس** می‌نامند.

به هر حال، وقتی مجموعهٔ یکسـانی از اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونهٔ برانگیخته، نور گسـیل می‌کنند، تمـام ذرات نور کاملاً یکسان و یک موج الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهند (شکل ۱- ب). برخلاف الکترون‌ها که ذرات فرمی هستند، تعداد زیادی فوتون مانند هم می‌توانند موج کوانتوامی یکسانی داشته باشند زیـرا فوتون‌ها ذرات بوز هسـتند و ذرات بوز از اصل طرد پائولی پیروی نمی‌کنند. نور متشکل از تعداد زیادی فوتون یکسان و یک موج الکترومغناطیسی **نور همدوس** نامیده می‌شود. نور همدوس



(الف) فوتون‌های نور ناهمدوس به‌طور مستقل تولید می‌شوند و طول موج‌ها و جهت‌های حرکت متفاوتی دارند.

(ب) فوتون‌های نور همدوس توسـط گسیل القایی تولید می‌شوند و از هر نظر مانند هم هستند.

شکل ۱.

به‌دلیل سرشـت تک‌موجی خود اثرهای تداخلی قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهد. این آثار را می‌توان به‌سهولت در نور همدوس گسیلیده از لیزرها مشاهده کرد.

درک خـود را وارسـی کنیـد: آشـوب نـور فوتون‌ها

پرسش: اگر بخواهید میدان الکتریکی در نور یک چراغ‌قوه را اندازه بگیرید، در می‌یابید که دارای افت‌وخیز کاتوره‌ای است. چرا میدان الکتریکی نور چنین نامنظم است؟

پاسـخ: چراغ‌قوه نور ناهمدوس تولیـد می‌کند که از امواج نوری مسـتقل تشکیل شده است که هریک با میدان الکتریکی مربوط به خود در تولید میدان الکتریکی مشارکت می‌کنند. اگر بخواهیـد این میدان کلی را اندازه بگیرید، آن را بسـیار نامنظم خواهید یافت.

دلیل: زیـرا فوتون‌های نور ناهمدوس مسـتقل هسـتند، میدان‌های الکتریکی تک‌تک آن‌ها همراه هم افت‌وخیز نمی‌کنند. در هر مکان و در هر زمان، تک‌تک میدان‌های الکتریکی به‌صورتی پیچیده و کاتوره‌ای با هم جمع می‌شـوند. با گذشـت زمان، این میـدان کلی به‌صـورت کاتـوره‌ای افت‌وخیز خواهد کـرد. نور همدوس که در آن هر فوتون مانند همهٔ فوتون‌های دیگر اسـت، میدان الکتریکی بسیار منظم‌تری دارد. زیرا تمام فوتون‌ها در آن مشارکت یکسانی دارند.

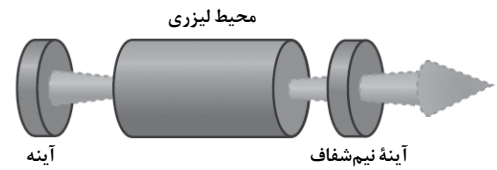
تقویت‌کننده‌های نور و نوسان

تولیـد نور همدوس نیاز به تقویـت دارد. کار را باید فقط با یک ذرهٔ نور شـروع و آن را چندین بار تکثیر کنیم. ابزار اساسی

برای این تکثیر نور یک **تقویت‌کنندهٔ لیزری** اســت (شکل ۲). وقتی نور ضعیفی وارد مجموعهٔ مناســبی از اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونه- **محیط لیزر**- شــود تقویت و درخشان‌تر می‌شود. نور جدید درســت همان ویژگی‌هــای نور اولیــه را دارد، ولی دارای فوتون‌های بیشتری است.

▲ **شکل ۲. تقویت‌کنندهٔ لیزری از اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونه برانگیخته برای افزایش تعداد ذره‌های نور خروجی از محیط لیزر استفاده می‌کند. نور ورودی با گسیل برانگیخته تکثیر می‌شود.**

ولی، وقتی به لیزرها می‌اندیشیم به‌ندرت وسیله‌ای را مجسم می‌کنیــم که فوتون‌هایی از جای دیگر را تکثیر کند. معمولاً آن را وسیله‌ای در نظر می‌گیریم که به‌خودی خود نور لیزر باید ذرهٔ نور اولیه را تولید ســپس با تکثیر آن ذرات دیگر را به‌وجود آورد. **نوســانگر لیزری** وسیله‌ای است که از خود محیط لیزری برای تأمین بذر فوتون بهره می‌گیرد و سپس آن را بارها تکثیر می‌کند (شــکل ۳). اگر محیط لیزر بین یک جفت آینهٔ به‌دقت طراحی شده قرار داده شــود، فرایند القا می‌تواند خودآغاز و خودنگهدار شود. ولی، آینه‌ها باید به‌خوبی خمیده شوند و بازتابندگی مناسبی داشــته باشند. معمولاً یک آینه باید فوق‌العاده بازتابنده باشد در حالی‌که آینهٔ دیگر باید بخش کوچکی از نوری را که به سطح آن می‌خورد از خود عبور دهد.



▲ **شــکل ۳. نوســانگر لیزر یک تقویت‌کنندهٔ لیزری است که بین آینه‌هایی قــرار دارد. وقتی نوســان صــورت می‌گیرد که محیط لیــزر خودبه‌خود یک فوتون را درســت در جهت درســت گســیل کند. این فوتون بین دو آینه به جلو و عقب می‌رود و بارها تکثیر می‌شود. با نیم‌شفاف بودن یکی از آینه‌ها مقداری از این نور از لیزر خارج می‌شود.**

وقتی محیط لیزری بین دو آینه قرار داده شود، این احتمال وجــود دارد که فوتونی که خودبه‌خود از یک ســامانهٔ برانگیخته گسیل شده است از آینه واجهد و به محیط لیزر برگردد یا وقتی فوتون برگشــته از محیط لیزری بگذرد تقویت می‌شــود. چون فوتون را یکی از ســامانه‌های برانگیخته گسیل کرده است طول موج مناســب دارد تا ســامانه‌های برانگیختهٔ دیگر آن را تقویت کنند.

وقتی فوتون اولیه محیــط لیزر را ترک می‌کند بارها تکثیر شــده اســت. این گروه فوتون‌های یکســان ســپس از آینهٔ دوم وامی‌جهند و برای گذشتن از محیط لیزری برمی‌گردند. این پس جهیدن از آینه‌ها ادامه می‌یابد تا اینکه تعداد فوتون‌های یکسان در مجموعه به تعدادی نجومی برسد.

■ شــاید به‌نظر برسد که یک فوتون باید طول موج و بسامد دقیقی داشته باشد و فقط در یک جهت حرکت کند، ولی این‌طور نیست. فوتون‌ها به‌صورت امواج الکترومغناطیسی حرکت می‌کنند و در بیشــتر از یک جهت گسترش می‌یابند. همچنین چون هر فوتون شروع و پایانی دارد، موج آن حاوی بیش از یک تک‌طول موج یا یک تک‌بسامد است. از این رو در حالی که لیزرها می‌توانند کامل‌تریــن امواج الکترومغناطیســی ممکن را به‌وجــود آورند، ایــن امواج باز هم کمی طرف خارج گســترش یافته‌اند و باز هم گستره‌ای از طول موج‌ها و بسامدها را دارند.

ســرانجام تعداد فوتون‌های مشــابه چنان زیاد می‌شود که محیط لیزری دیگر قادر به تقویت آن‌ها نیست. محیط لیزری فقط این تعداد انرژی ذخیره شــده دارد و فقط این تعداد سامانه‌های برانگیخته در آن وجود دارد. اگر محیط لیزری به دریافت انرژی بیشتری ادامه دهد، شــاید تقویت نور تا اندازه‌ای تداوم یابد. اگر انرژی زیادتری دریافت نکند، تقویت نور سرانجام متوقف می‌شود.

برای اینکه نور از این نوسانگر لیزر خارج شود، معمولاً یکی از آینه‌ها **نیم‌شفاف** است- یعنی بعضی از فوتون‌هایی که به سطح آینه می‌خورند به‌جای بازتاب از آن می‌گذرند. شیشهٔ دوطرفه‌ای که برای نظارت به‌کار می‌رود در واقع آینهٔ نیم‌شــفاف است. این تراگســیل باریکهٔ نور خروجی، باریکهٔ لیــزر را به‌وجود می‌آورد. خــروج باریکهٔ لیزر از آینه مادام که فراینــد تقویت بتواند از آن حمایت کند تداوم می‌یابد.

چون این باریکهٔ لیزر از نسخه‌های بدل فوتون اولیه تشکیل شده اســت، نور همدوس اســت. به دلایل فنی، بسیاری لیزرها همزمان بیش از یک فوتون اولیه را تکثیر می‌کنند. ولی با تنظیم دقیق مناسب، می‌توان کاری کرد که یک فوتون اولیه در باریکه لیزر غالب باشد. وقتی باریکهٔ چراغ‌قوه‌ای را با یک عدسی کانونی می‌کنید، فوتون‌های مســتقل آن درســت کاملاً با هم در کانون عدسی متمرکز نمی‌شوند. علت آن است که فوتون‌ها سرِ چراغ‌قوه را در جهت‌های اندکی متفاوت ترک می‌کنند و گســترهٔ وسیع طول‌موج‌ها مسائل پاشندگی در عدسی را به‌وجود می‌آورند. ولی، چون همــهٔ فوتون‌های باریکهٔ لیزر مثل هم‌اند- پس در مســیر یکســانی حرکت می‌کنند و طول موج‌های آن‌ها یکسان است- همــهٔ آن‌ها می‌توانند با هم در نقطــهٔ فوق‌العاده کوچکی کانونی شــوند. به این دلیل است که در نشــانگر لیزری از لیزر استفاده

می‌کنند، باریکهٔ لیزر می‌تواند نقطهٔ بسیار کوچکی را روی غلتک فوتورسانا که در فرایند چاپ زیراکس برای تولید تصویر به‌کار می‌رود روشن کند.

برداشت‌های غلط متداول

باریکه‌های لیزر

برداشت غلط: باریکهٔ لیزر استوانهٔ تابان باریکی است که در فضا با سرعت تیر حرکت می‌کند.

رفع مشکل: باریکهٔ لیزر نوری است که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کند. برای آنکه این باریکه از پهلو قابل مشاهده گردد، باید توسط چیزی در مسیرش، مثل گردوخاک، بخار یا مولکول‌های هوا پراکنده شود. در فضای تهی، باریکهٔ لیزر نامرئی است مگر اینکه چشمان شما را مستقیماً روشن کند.

درک خود را وارسی کنید: مقدار بیشتر از یک چیز خوب

پرسش: اگر باریکهٔ لیزر را از یک نوسانگر لیزری معین بگیرید و آن را به یک تقویت‌کنندهٔ لیزر مشابه بفرستید، باریکهٔ لیزر چه تغییری می‌کند؟

پاسخ: باریکه حتی درخشان‌تر خواهد شد.

دلیل: نوسانگر لیزر معمولاً تا جایی که بتواند، بسته به مقدار انرژی ذخیره شده در محیط لیزر شدیدترین باریکه را گسیل می‌کند. این باریکهٔ نور می‌تواند با عبور از یک تقویت‌کنندهٔ لیزر جداگانه بیشتر تقویت شود. اغلب لیزرهای پرتوان از یک نوسانگر لیزر و یک تقویت‌کنندهٔ لیزر یا بیشتر استفاده می‌کنند تا باریکه‌های بسیار روشنی را به‌وجود آورند.

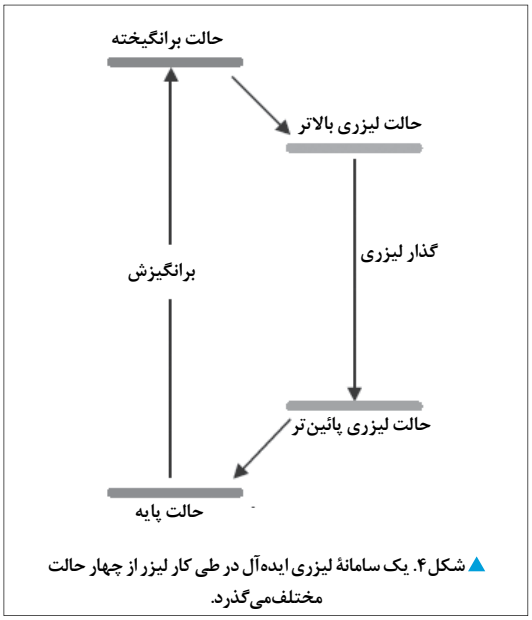
محیط لیزری چگونه کار می‌کند؟

به‌دست آوردن سامانه‌های برانگیختهٔ لازم برای تقویت نور برای لیزرها اهمیت بسیار دارد. در حالت ایده‌آل یک لیزر شامل چهار حالت متفاوت یک اتم یا یک سامانهٔ اتم‌گونه است: حالت پایه، یک حالت برانگیخته، حالت لیزری بالاتر و حالت لیزری پایین‌تر. در ادامه دلیل داشتن این چهار حالت جداگانه را روشن خواهیم ساخت.

اتمی را در نظر می‌گیریم که به‌صورت یک تقویت‌کنندهٔ لیزری ایده‌ال عمل می‌کند (شکل ۴).

اتم در آغاز در حالت پایه است. برخورد یا جذب یک فوتون، با دادن انرژی لازم برای تقویت نور، آن را به‌حالت برانگیخته انتقال می‌دهد. سپس اتم یا با گسیل یک فوتون یا بر اثر برخورد به حالت لیزری بالاتر منتقل می‌شود. این انتقال اولیه مهم است زیرا مانع برگشت مستقیم اتم برانگیخته به‌حالت پایه و اجتناب از فرایند تقویت می‌شود. وقتی اتم به حالت لیزری بالاتر منتقل شد در آنجا قرار می‌گیرد و به اندازهٔ کافی باقی می‌ماند تا نور به اندازهٔ کافی تقویت شود.

اتم آماده است تا فوتون عبوری را کپی کند. ولی هر فوتون قبلی این کار را نمی‌کند، بلکه باید با فوتون‌هایی که اتم قابلیت گسیل آن‌ها را دارد سازگار باشد. به‌عنوان مثال، اتم نئون با الکترون برانگیختهٔ 3p می‌تواند فوتون قرمز را کپی کند ولی نمی‌تواند فوتون آبی را کپی کند. به‌دلیل این گزینش رنگ تقویت‌کنندهٔ لیزر است که بیشتر باریکه‌های لیزر تک‌رنگ خالصی دارند.



▲ شکل ۴. یک سامانهٔ لیزری ایده‌آل در طی کار لیزر از چهار حالت مختلف می‌گذرد.

وقتی فوتون مناسبی از اتم بگذرد، باعث گسیل یا کپی کردن فوتون می‌شود و اتم دستخوش یک گذار تابشی به حالت لیزری پایین‌تر می‌شود. تا اینجا همه چیز روبه‌راه است. ولی، اگر اتم در حالت لیزری پایین‌تر بماند، شاید فوتونی از نور لیزر را جذب کند و به‌حالت لیزری بالاتر برگردد. برای دوری از این نوع به دام افتادن تابشی، اتم باید یا با گسیل یک فوتون یا در نتیجهٔ برخوردی دیگر به‌سرعت به‌حالت پایه منتقل شود. در این صورت اتم آماده است تا تمام چرخه را دوباره شروع کند.

این چرخهٔ چهار حالته یا چیزی شبیه آن را می‌توان تقریباً در تمام لیزرها یافت. این چرخه به لیزر کمک می‌کند تا **وارونی جمعیت** بین حالت‌های لیزری بالاتر و پایین‌تر به‌وجود آورد؛ وضعیتی که در آن تعداد اتم در حالت لیزری بالاتر و آماده برای گسیل نور لیزر بیشتر از اتم‌های حالت لیزری پایین‌تر و آمادهٔ جذب نور است. ایجاد وارونی جمعیت در تقویت لیزر اهمیت حیاتی دارد زیرا بدون آن محیط لیزر بیشتر جذب‌کننده است تا تقویت‌کننده و نمی‌تواند نور شدید به‌وجود آورد.

در هر لیزر، چیزی انرژی لازم برای انتقال اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونه در محیط لیزر را به حالت‌های برانگیخته فراهم می‌کند تا وارونی جمعیت به‌وجود آید. این انتقال انرژی به محیط لیزر برای

آماده‌ســازی تقویت نور، **دمش** نامیده می‌شود. چگونگی دمش یک محیط لیزری معین به نوع لیزر بستگی دارد.

متداول‌ترین سازوکارهای دمش، الکترونیکی یا نوری هستند. در دمش الکترونیکی، از جریان ذرات باردار اســتفاده می‌شود تا از انرژی جنبشــی یا الکتروستاتیکی خود برای برانگیزش اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونه از حالت‌های پایه به حالت‌های برانگیخته اســتفاده کنند. در دمش نوری، نور شدید به محیط لیزر تابانده می‌شود تا برانگیزش مشابهی را ایجاد کند.

مهم‌ترین مثال دمــش نوری لیزرهای حالــت جامد یون-آلاییده‌انــد. این لیزرها مبتنی‌بر یون‌های اتمی قرار گرفته‌اند در جامدهای شفاف‌اند. یون‌های معمول عبارت‌اند از تیتانیم (Ti)، نئودیمیم (Nd)، و اربیم (Er)، و آن‌ها را اغلب در یاقوت، تتریم آلومینیم گارنت (YAG) یا شیشــه قرار می‌دهند. لیزرهای Ti: یاقــوت، Nd: یــاگ، و Er: لیزرهای شیشــه‌ای در پژوهش‌های جدید، فناوری و سامانه‌های مخابرات نوری اهمیت دارند. وقتی این محیط‌های لیزر در معرض نور شــدید قرار گیرند، یون‌های آن‌هــا برانگیختــه می‌شــوند و می‌توانند به‌صورت نوســانگر یا تقویت‌کننده‌های لیزر عمل کنند (شکل‌های ۵ و ۶).

▲ شــکل ۵: در یک لیزر با دمش نوری، نور شــدید یک لامپ فلاش، لامپ قوسی، یا حتی یک لیزر دیگر انرژی را به محیط لیزر منتقل می‌کند. اتم‌ها یا سامانه‌های اتم‌گونهٔ محیط این انرژی را ذخیره می‌کنند و برای تقویت نور به کار می‌گیرند.

▲ شــکل ۶. این تقویت‌کننده لیــزری با دمش لامپ درخشــی حاوی میلهٔ نئودیمیم: YAG ارغوانی اســت. میله در نیمهٔ پایین جعبهٔ تقویت‌کنندهٔ باز و پوشیده از طلا قرار دارد و با لولهٔ شیشه‌ای محافظت می‌شود. نور یک لامپ فــلاش دراز در نیمهٔ بالایی جعبــه یون‌های نئودیمیــم را برانگیخته می‌کند به‌طوری که آن‌ها می‌توانند نور فروسرخی را که به‌طور افقی از میله می‌گذرد تقویت کنند.

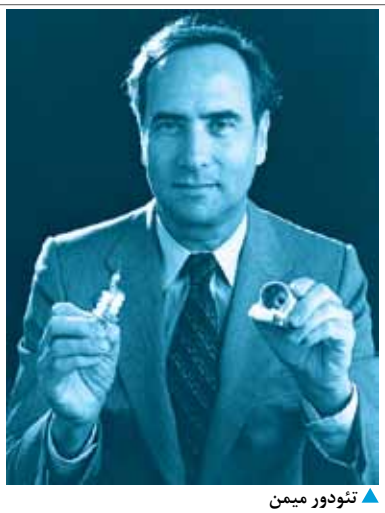
درک خود را وارسی کنید: نه خیلی سریع

پرســش: یک مأمور مخفی در فیلم با استفاده از یک لیزر مدادی کوچک، دســتی ظریف تیغهٔ فلزی ضخیمی را ســوراخ می‌کند. چرا اصولاً ساخت لیزری با این توان ناممکن است؟

پاسخ: نور چنین باریکهٔ لیزر باید حامل مقدار عظیمی توان باشد. چیزی باید این توان را به محیط لیزر منتقل کند، کاری که در چنین دستگاه ظریفی غیرممکن است.

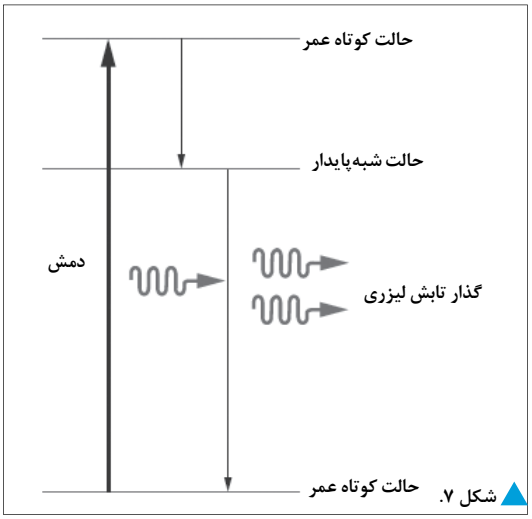
دلیل: تــوان باریکهٔ لیزر از محیط لیزری به‌دســت می‌آید. محیط لیزری نیز باید آن را از جای دیگری به‌دســت آورد. چون باتری‌ها نمی‌توانند هزاران ولــت توان الکترونیکی تأمین کنند، احتمال ساخت لیزرهای دســتی توانمند وجود ندارد. حتی اگر منبع توان مناســبی وجود داشته باشــد، این لیزرها خیلی گرم خواهند شد. تبدیل توان به نور کاملاً کارآمد نیست و بیشتر انرژی به‌صورت انرژی گرمایی به اجزای لیزر داده می‌شود. لیزرها برای انتقال این انرژی تلف شده نیازمند خنک‌سازی هستند.

کوشش‌های آغازین برای ساخت لیزر



▲ تئودور میمن

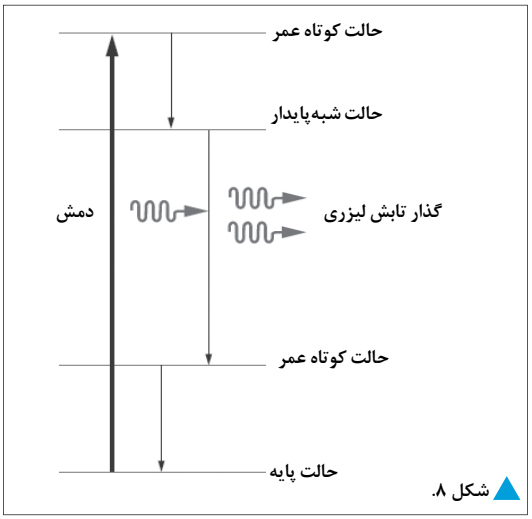
اولیــن لیزر را، میمن در ســال ۱۹۶۰ ســاخت. این لیزر بر مبنای اتم ســه ترازی بود (شــکل ۷). محیط این لیزر یک میلهٔ یاقوت جامد اســت کــه در آن اتم‌های کروم مســئول کار لیزر هستند. این اتم‌ها، که ابتدا در حالت پایه‌اند، به کمک یک چشمهٔ انرژی خارجــی (فوران نور از یک لامپ فــلاش که میلهٔ یاقوت را فرا گرفته اســت) به حالت برانگیخته دمیده می‌شوند. حالت برانگیخته (با گســیل خودبه‌خود) به سرعت به حالت برانگیختهٔ پایین‌تر وا می‌پاشد، که این حالت پایین‌تر حالتی شبه‌پایدار است. اتم برای مدتی نسبتاً طولانی، شاید ۱ ms، در مقایسه با ۰/۱ ns برای حالت‌های کوتاه عمر، در آن حالت باقی می‌ماند و سپس با رفتن به حالت پایه‌گذار لیزری انجام می‌دهد.



شکل ۷.

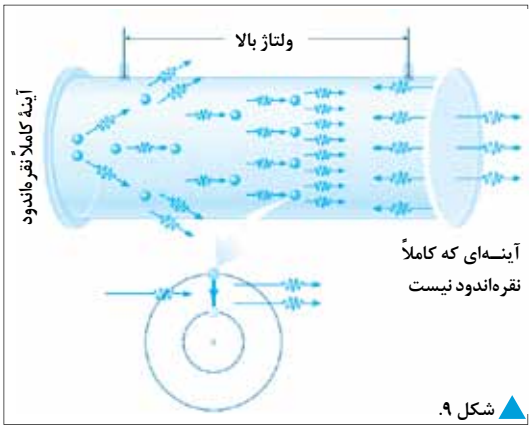
علی جوان

علی جوان اولین لیزر گازی (مخلوطی کم‌فشار از ۱۵ درصد هلیم و ۸۵ درصد نئون) را که همچنان به‌طور گسترده‌ای به‌کار می‌رود در سال ۱۹۶۰ (تقریباً چند ماه بعد از



شکل ۸.

میمن) ساخت. لیزر هلیم- نئون مثالی از یک لیزر چهارترازی است (شکل ۸). یک تخلیهٔ الکتریکی با ولتاژ بالا در دو سر مخلوط هلیم- نئون در لولهٔ شیشه‌ای برقرار می‌شود. وقتی اتم با گسیل خودبه‌خود فوتونی موازی با محور لوله گسیل کند، فرایند لیزر شروع می‌شود. این فوتون با گسیل القایی باعث می‌شود تا اتم دیگری دو فوتون موازی با محور لوله گسیل کند. این دو فوتون به نوبهٔ خود دو اتم دیگر را القا می‌کنند و چهار فوتون حاصل می‌شود. از چهار فوتون، هشت فوتون حاصل می‌شود و به همین ترتیب نوعی بهمن به‌وجود می‌آید. برای اطمینان از اینکه فوتون‌های بیشتر و بیشتری با گسیل القایی به‌وجود آیند دو انتهای لوله نقره‌اندود می‌شوند تا آینه‌هایی تشکیل شوند و فوتون را در مخلوط هلیم- نئون به جلو و عقب باز بتابانند. شکل ۹ طرحی از یک لیزر هلیم- نئون را نشان می‌دهد. زیاد شدن فوتون‌ها گسیل القایی را نشان می‌دهد که وقتی رخ می‌دهد که الکترون اتم نئون القا می‌شود تا از تراز بالاتری به تراز پایین‌تر تغییر کند.



شکل ۹.

غیر از لیزر هلیم- نئون و لیزر یاقوت، انوع دیگر لیزر نیز وجود دارد. لیزر آرگون یونی، لیزر کربن دیوکسید، لیزر حالت جامد گالیم ارسنایدو لیزرهای شیمیایی رزینه‌ای (chemical dye) از این جمله‌اند.

بسته به اینکه لیزر به‌طور پیوسته کار کند یا به‌صورت تپی، توان باریکهٔ لیزر می‌تواند در گسترهٔ میلی وات تا مگاوات باشد. چون لیزرها تابش الکترومغناطیسی تکفام همدوس تولید می‌کنند که می‌توانند در باریکهٔ نازک با شدت زیاد محصور باشند، در موارد گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

کاربردهای لیزر

امروزه لیزرها در موارد گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها در دستگاه‌های پخش موسیقی و فیلم، جوش‌دادن قسمت‌های مختلف اتومبیل به‌یکدیگر، انتقال

مکالمه‌های تلفنی، و سایر شکل‌های ارتباطات راه‌دور، مطالعهٔ ساختار مولکولی و اندازه‌گیری دقیق فاصله‌ها به‌کار می‌روند. در ادامه با برخی از این کاربردها با جزئیات بیشتری آشنا می‌شویم.

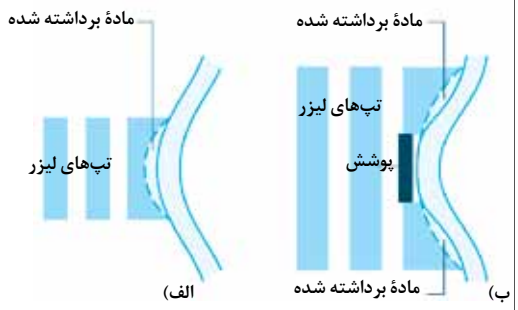
فیزیک فرازیاب لیزری

شکل ۱۰ نمونهٔ تحسین‌برانگیزی است که نشان می‌دهد چگونه می‌توان از لیزر برای اندازه‌گیری دقیق فاصله‌ها استفاده کرد. این عکس نقشه‌ای سه‌بعدی از توپوگرافی (مکان‌نگاری) در مریخ است که با فرازیاب لیزری مدارگرد مریخ[1] (MOLA) در فضاپیمای نقشه‌برداری سراسری مریخ صورت گرفته است. نقشه از اندازه‌گیری ۲۷ میلیون ارتفاع به‌وجود آمده است، که هریک با فرستادن تپ‌های لیزری به سطح مریخ و اندازه‌گیری زمان‌های برگشت آن‌ها به‌دست آمده است. درهٔ برخوردی بزرگ پلاس پلاتینیا[2] در سمت چپ پایین شکل دارای عرض ۱۸۰۰ کیلومتر است. در طرف راست بالای شکل در کنارهٔ تصویر الیسیوم مونس[3] قرار دارد که یک آتش‌فشان بزرگ است.

▲ شکل ۱۰.نقشه‌ای سه‌بعدی از توپوگرافی مریخ

فیزیک جراحی چشم با PPK [4]

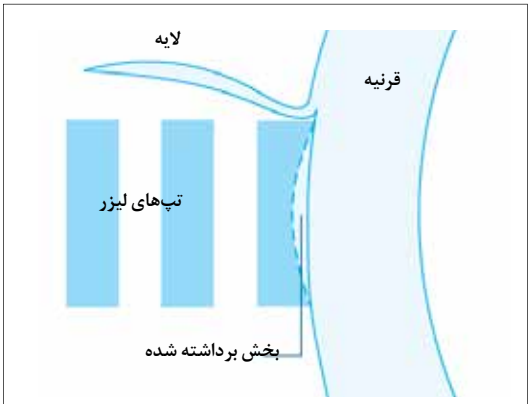
یک روش مبتنی بر لیزر به‌نام PPK (برش قرنیه با فوتوشکست) درمان جایگزینی را برای نزدیک‌بینی و دوربینی در اختیار می‌گذارد که متکی بر عدسی نیست. در این روش برای برداشتن مقدار کوچکی از بافت قرنیه و در نتیجه تغییر خمیدگی آن از لیزر استفاده می‌شود. همان‌طور که می‌دانیم نور از قرنیه وارد چشم می‌شود و بیشترین شکست در مرز هوا- قرنیه رخ می‌دهد. بنابراین، تغییر خمیدگی این مرز می‌تواند نارسایی‌های شکست نور در چشم را تصحیح کند و از این رو باعث شود تا تصویر روی شبکیه، جایی که باید باشد، متمرکز شود. در بهترین حالت، قرنیه گنبدی شکل است. ولی، اگر این گنبد خیلی شیب‌دار باشد، پرتوهای نور در جلوی شبکیه متمرکز می‌شوند و نزدیک‌بینی پیش می‌آید. همان‌طور که شکل ۱۱ الف نشان می‌دهد، نور لیزر بافت را از مرکز قرنیه برمی‌دارد و در نتیجه آن را هموارتر می‌کند و فاصلهٔ کانونی مؤثر چشم را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، اگر شکل قرنیه خیلی تخت باشد، پرتوهای نور اگر بتوانند در پشت شبکیه متمرکز می‌شوند و دوربینی پیش می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱۱ ب دیده می‌شود و اکنون مرکز قرنیه پوشانده شده و از لیزر برای برداشتن بافت کناری استفاده شده است. این کار شیب قرنیه را بیشتر می‌کند و در نتیجه فاصلهٔ کانونی مؤثر چشم کوتاه‌تر و پرتوها روی شبکیه متمرکز می‌شوند.



◀ الف) برای تصحیح نزدیک‌بینی با استفاده از روش PPK لیزر بافت را در مرکز قرنیه بخار (خط تیره) و در نتیجه آن را هموار می‌کند.
◀ ب) برای تصحیح دوربینی لیزر بافت ناحیهٔ پیرامون قرنیه را بخار می‌کند و در نتیجه شیب قسمت بیرونی را بیشتر می‌کند.
▲ شکل ۱۱.

فیزیک جراحی چشم با LASIK [5]

روش لیزیک (لایه‌برداری محلی از قرنیه به کمک لیزر) از یک تیغهٔ برنده که با موتور کار می‌کند و ریز برش قرنیه خوانده می‌شود و بهره می‌گیرد تا به لایهٔ نازک مختصری (حدود ۰/۲ mm ضخامت) را در جلوی قرنیه جدا کند (شکل ۱۲). لایه عقب کشیده می‌شود و سپس باریکهٔ لیزر با بخار کردن سلول‌ها بافت زیر قرنیه را ترمیم می‌کند. سپس لایه به جای خود برگردانده می‌شد و هیچ بخیه‌ای لازم نیست. نور لیزر در روش‌های PPK و LASIK به صورت تپ (پالس) است و از لیزر اگزیمر فرابنفش با طول موج ۱۹۳ nm استفاده می‌شود. قرنیه این طول موج را به‌خوبی جذب می‌کند به‌طوری که تپ‌های ضعیف می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند و این به برداشت بسیار دقیق و قابل کنترل بافت قرنیه می‌انجامد. معمولاً با هر تپ ۰/۱ تا ۰/۵ μm از بافت بدون آسیب رسیدن به لایه‌های مجاور برداشته می‌شود.



شکل ۱۲.

فیزیک برداشتن لکه‌های ماه‌گرفتگی

کاربرد دیگر لیزر در پزشکی درمان بدشکلی‌های مویرگی مادرزادی است که به لکه‌های ماه‌گرفتگی معروف‌اند و ۳ درصد نوزادان هنگام تولد به آن دچارند. این ماه‌گرفتگی‌ها معمولاً نظیر شکل ۱۳ الف در سر و گردن هستند. امروزه، بهترین درمان برای این لکه‌های ماه‌گرفتگی استفاده از لیزر رزینه‌ای پتی[۶] است. شکل ۱۳ ب نمونه‌ای عالی از نتیجهٔ به‌دست آمده از تابش‌دهی نور لیزر است. اکسی هموگلوبین مویرگ‌های مادرزادی نور را جذب و در فرایندی آن را تخریب می‌کند، بدون اینکه به بافت عادی مجاور صدمه‌ای بزند. سرانجام، رگ‌های خونی عادی جایگزین مویرگ‌های تخریب شده می‌شوند و ماه‌گرفتگی ناپدید می‌شود.

الف) بیمار با ماه‌گرفتگی قبل

ب) پس از درمان با استفاده از لیزر رزینه‌ای تپی

شکل ۱۳.

فیزیک درمان فوتو دینامیکی سرطان

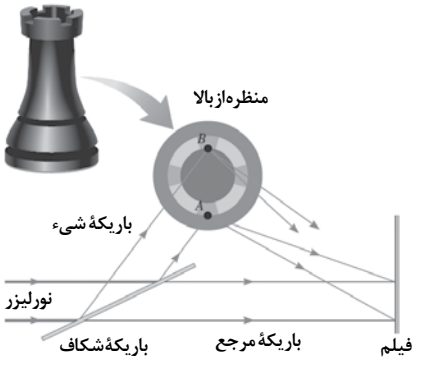
در درمان سرطان، لیزر همراه با داروهای فعال شده با نور در درمان فوتودینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش شامل تزریق داخل وریدی دارو است، به‌طوری‌که غده بتواند آن را از جریان خون جذب کند، مزیت این روش آن است که دارو درست نزدیک سلول‌های سرطانی قرار می‌گیرد. وقتی دارو با نور لیزر فعال شود، واکنش شیمیایی صورت می‌گیرد که سلول‌های سرطانی و کمی از رگ‌های خونی که آن‌ها را تغذیه می‌کنند متلاشی می‌شوند. در شکل ۱۴ بیماری تحت درمان است که سرطان مری دارد. اندوسکوپی که از تارهای نوری استفاده می‌کند از گلوی بیمار پایین فرستاده می‌شود تا نور قرمز لیزر را به محل غده و داروی فعال‌شده هدایت کند.

شکل ۱۴. فوتودینامیک درمانی برای درمان سرطان مری این بیمار انجام شده است. نور قرمز لیزر با یک اندوسکوپ که با تارهای نوری کار می‌کند به محل غده فرستاده می‌شود.

فیزیک تمام‌نگاری

یکی از شناخته‌شده‌ترین کاربرد لیزرها در تمام‌نگاری[۷] یعنی فرایندی برای تشکیل تصویرهای سه‌بعدی است. اطلاعات مورد استفاده در تشکیل تصویر سه‌بعدی روی فیلم عکاسی گرفته می‌شود، که آن را تمام نگاشت می‌نامند. شکل ۱۵ چگونگی تشکیل تمام نگاشت را توضیح می‌دهد. نور لیزر به یک آینهٔ نیم نقره‌اندود یا باریکه شکاف برخورد می‌کند که بخشی از نور را بازمی‌تاباند و بخشی را عبور می‌دهد. در شکل بخش بازتابیده را باریکهٔ شیء می‌نامند زیرا شیء را (که یک مهرهٔ شطرنج است) روشن می‌کند. بخش عبور کرده باریکهٔ مرجع خوانده می‌شود. باریکهٔ شیء از مهرهٔ شطرنج در نقاطی مثل A و B باز می‌تابد و همراه با باریکهٔ مرجع به فیلم می‌تابد. یکی از ویژگی‌های اصلی نور لیزر در همدوس بودن آن است. در نتیجه، نور دو باریکه رابطهٔ فازی پایداری دارند، مثل نور دو شکاف در آزمایش یانگ. به‌واسطهٔ رابطهٔ فازی پایدار و اینکه دو باریکه فاصله‌های متفاوتی

را طی کرده‌اند، یک طرح تداخلی روی فیلم تشـکیل می‌شـود. این طرح، تمام نگاشـت است و اگرچه بسیار پیچیده است، قابل مقایسه با طرح فریزهای روشن و تاریک تشکیل شده در آزمایش دوشکاف است.



▲ شکل ۱۵. ترتیب مورد استفاده برای تشکیل تمام‌نگار

دیودهای نور گسیل و لیزرهای دیودی

متداول‌ترین لیزرها با دمش الکترونیکی، لیزرهای دیودی هستند. این لیزرها که در نشانگرها، بارکدخوان‌ها، چاپگرها و دستگاه‌های پخش CD و DVD یافت می‌شوند رابطهٔ نزدیکی به دیودهای نورگسـیل دارند که خودشـان شباهت زیادی به دیودهای معمولی دارند. ولـی در حالی‌که دیودهای معمولی صرفاً برای کنترل جریان‌ها در حالی‌که توان هرچه کمتر تلف شود، طراحی شـده‌اند لیزر و دیودهای نورگسیل برای تولید نور بهینه‌سـازی شـده‌اند. وقتی دیود دارای پیش ولت موافق اسـت و جریان از آند به کاتد آن جاری اسـت، الکترون‌های تراز رسـانش در کاتد نـوع n در پیوند p-n حرکت می‌کنند تا به‌صورت الکترون‌های تراز رسـانش آنـد نوع p درآیند. در واقـع، در این صورت آنـد در حالت برانگیخته اسـت: دارای الکترون‌های تراز رسانش و ترازهای ظرفیت خالی.

آنچه بعد روی می‌دهد به ویژگی‌های دیود بسـتگی دارد. در دیود سیلیسـیمی معمولی، الکترون‌های تراز رسـانش به ترازهای ظرفیت خالی منتقل می‌شـوند بدون اینکه نور قابل ملاحظه‌ای تولید کنند. سـاختار نوار سیلیسـیم ویژگی‌هایی دارد که مانع گسـیل نور می‌شـود، از ایـن رو این گذارهای الکترونی بـه جای تولید نور ارتعاش‌های داخلی تولید و دیود را گرم می‌کنند.

در دیودهای خاصی که از نیمرساناهای نامتعارف ساخته شده‌اند، الکترون‌های تراز رسانش در آند نوع p بارها گذارهای تابشـی می‌یابند تا ترازهای ظرفیت را خالی کنند و در نتیجه نور گسـیل شـود. ترکیب اولیه از آمیـزه‌ای از گالیم، ایندیم، آلومینیم، ارسـنیک، فسـفر و نیتروژن دیودهای نورگسیل یا LEDهـا نامیده می‌شـوند. هم‌اکنون LED هـا در هر رنگ رنگین‌کمان وجود دارند، از جمله فروسـرخ، سـرخ، نارنجی، زرد، سبز، آبی، بنفش و فرابنفش (کل ۱۶).

اگرچه LED های سفید نیز وجود دارند، اما در واقع LED های بنفش و فرابنفش هسـتند که با داشتن فسفر نور سفید مهتابی دارند.

▲ شکل ۱۶. این LEDها به‌طور متوالی وصل می‌شوند به‌طوری که جریان یکسـانی به‌ترتیب از آن‌ها می‌گذرد. ولی، گاف نواری متفاوت آن‌ها باعث می‌شود که نور با رنگ‌های متفاوت گسیل کنند.

رنگ LEDها با انرژی آزاد شده هنگام یک انتقال الکترون در آند نوع P آن از تراز رسـانش به تراز ظرفیت رابطهٔ مستقیم دارد. مناسـب‌ترین یکا برای اندازه‌گیری این انرژی الکترون ولت (eV) است- انرژی آزاد شده وقتی ولتاژ یکای اصلی بار الکتریکی ۱ V کاهش یابد (۱ eV مساوی $۱/۶۰۲۱\times۱۰^{-۱۹}$ J است).

یـک LED قرمـز نوعـی الکتـرون هنـگام انتقـال از تـراز رسـانش بـه تـراز ظرفیـت الکتـرون ۱/۹ eV آزاد و فوتونـی بـا انـرژی ۱/۹ eV تولیـد می‌کنـد. بـا توجـه بـه معادلـهٔ $\lambda=v/f$، فوتـون ۱/۹ eV دارای بسـامد $۴/۶\times۱۰^{۱۴}$ Hz و طول موج ۶۵۰ nm است.

برای به‌کارافتادن و تولید این فوتون‌های ۱/۹eV، LED قرمز باید دارای پیش‌ولت موافق تقریباً ۱/۹ eV با افت ولتاژ دست کم ۱/۹V باشد. دیود حامل جریان از این افت ولتاژ برای انتقال الکترون به نوار رسانش آند، بهره می‌گیرد که در آن الکترون‌ها انرژی‌هایی ۱/۹ eV بالاتـر از نـوار ظرفیـت دارنـد. سـپس بیشـتر این الکترون‌ها انرژی‌هـای اضافی خود را به‌صورت فوتون‌های نور ۱/۹ eV آزاد می‌کنند.

هرچه طـول موج نور که LED گسـیل می‌کند کوتاه‌تر

باشد، باید هنگام انتقال الکترون از تراز رسانش به تراز ظرفیت انرژی بیشتری آزاد کند و گاف نوار نیمرسانا بزرگ‌تر باشد. یک LED بنفش که نور ۴۰۰ nm گسیل می‌کند به گاف نواری حدود ۳/۱ eV نیاز دارد تا فوتون‌های ۳/۱ eV خود را تولید کند. این LED همچنین به پیش ولت موافق ۳/۱ V نیاز دارد. نیاز افت ولتاژهای بزرگ‌تر برای LEDها در نزدیکی انتهای بنفش طیف نشان می‌دهد. که چرا این LEDها به منبع‌های توانی با ولتاژ بالاتر نیاز دارند.

متأسفانه کمتر از نیمی از الکترون‌هایی که به پیوندگاه p-n دیود نورگسیل فرستاده می‌شوند موفق به نوردهی می‌گردند. اگرچه بخش قابل توجهی از این الکترون‌ها فوتون‌هایی را گسیل می‌کنند، اما اغلب فوتون‌ها پیش از ترک LED دوباره در نیمرسانا جذب می‌شوند؛ همان تعداد گذارهای تابشی که این نور را گسیل می‌کنند (تراز رسانش ← تراز ظرفیت) می‌توانند آن را نیز جذب کنند (تراز ظرفیت← تراز رسانش).

به‌رغم این مشکلات، LEDهای امروزی می‌توانند نور مرئی با کارآیی انرژی قابل مقایسه با لامپ‌های مهتابی تولید کنند. بهبود کارایی LED و طول عمر آن‌ها تداوم دارد و آن‌ها به‌تدریج مهم‌ترین شکل منبع روشنایی می‌شوند.

لیزر دیودی کاملاً شبیه LED است، بجز آنکه لیزر دیودی برای تقویت نور از گذارهای تابشی خود استفاده می‌کند. چون این نوع تقویت فقط وقتی روی می‌دهد که گسیل نور از جذب نور بیشتر باشد، لیزر دیودی باید بین حالت لیزری بالاتر و حالت لیزری پایین‌تر وارونی جمعیت تولید کند.

لیزر دیودی این وارونی را با تمرکز جریان در پیوندگاه p-n بسیار باریکی به‌دست می‌آورد که ناشی از نیمرساناهای بسیار آلاییده است. جریان شدید تعداد بسیار زیادی از الکترون‌ها را دارد نوار رسانش آند می‌کند که در آنجا به سرعت در پایین‌ترین ترازهای رسانش انرژی یعنی حالت لیزری بالاتر قرار می‌گیرند. آلایش زیاد بیشتر الکترون‌های ترازهای ظرفیت آند یعنی حالت لیزری پایین‌تر را خالی می‌کند وجود الکترون‌های زیاد در حالت نیروی بالاتر و الکترون‌های کم در حالت لیزری پایین‌تر دیود وارونی جمعیت حاصل می‌شود و می‌تواند نور را تقویت کند.

بیشتر لیزرهای دیودی به‌عنوان نوسانگرهای لیزری عمل می‌کنند (شکل ۱۷) و نوری را که به‌طور خودبه‌خود گسیل کرده‌اند تا هنگام تشکیل باریکهٔ همدوس شدید تقویت می‌کنند. دو سر خود آند معمولاً به قدر کافی بازتابنده است تا به‌صورت آینه عمل کند و نوسانگر لیزری کاملی را تشکیل

▲شکل ۱۷. این تراشهٔ ظریف نیمرسانا یک لیزر دیودی است که وقتی جریانی از آن بگذرد باریکهٔ شدیدی از نور همدوس گسیل می‌کند.

دهد. ولی برای متمرکز کردن نور لیزر در یک راستا و کنترل ویژگی‌های باریکهٔ آن، بیشتر دیودهای لیزری ساختارها و پوشش‌های پیچیده‌ای دارند.

همانند LED، طول موج و رنگ لیزر دیودی بیشتر به گاف نوار آند آن بستگی دارد. لیزرهای دیودی فروسرخ و سرخ ابتدا تکامل و به سرعت به محصولات گوناگون خانگی گسترش یافتند. تکامل لیزرهای دیودی با گاف‌های نوار بلندتر و طول‌موج‌های کوتاه‌تر فرایند طولانی و پرزحمتی بوده است. ولی، اکنون رنگ طیف لیزرهای دیودی به فرابنفش گسترش یافته است، و چون این لیزرهای با طول موج کوتاه ارزان‌تر و در دسترس‌ترند، در تولیدهای روزمره به‌کار می‌روند.

درک خود را وارسی کنید: روشن‌تر کردن

پرسش: وقتی جریان موجود در چراغ التهابی را افزایش دهید، روشن‌تر می‌شود و رنگ آن به‌طرف انتهای طیف انتقال می‌یابد. اگر جریان موجود در LED یا لیزر دیودی را افزایش دهید برای روشنایی و رنگ نور چه اتفاقی می‌افتد؟

پاسخ: دیود روشن‌تر می‌شود ولی رنگ آن چندان تغییر نمی‌کند.

دلیل: روشنایی دیود به تعداد الکترون‌های عبوری پیوندگاه p-n آن در هر ثانیه بستگی دارد، و افزایش این تعداد روشنایی را افزایش می‌دهد. ولی رنگ نوری که دیود گسیل می‌کند عمدتاً به گاف نوار مربوط است و در نتیجه با افزایش جریان در دیود زیاد تغییر نمی‌کند.

پی‌نوشت‌ها

1. Mars Orbiter Laser Altimeter
2. Hellas Planitia
3. Elysium Mons
4. Photorefrective Keratectomy
5. Laser Assisted in Situ Keratomileusis
6. Pulsed dye laser
7. holography

منابع

1. Louis A. Bloomfield, How Things Work, 4th Edition, Jhon Wiley & Sons, 2010.
2. Cutnell & Johnson, Physics, 9th Edition, Jhon Wiley & Sons, 2012.
3. Kenneth Krane, Modern Physics, 3 th Edition, Jhon Wiley & Sons, 2012.

(ویرایش دوم این کتاب با عنوان فیزیک جدید، توسط دکتر منیژه رهبر و بهرام معلمی ترجمه شده و توسط نشر مرکز دانشگاهی منتشر شده است.)