بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاهِ علم‌وصنعت ایران

دانشکده‌یِ فیزیک

پروژه‌یِ درس فیزیکِ لیزر

لیزرهایِ تصادفی

توسعه، امکانات و کاربردها

دانشجو: کمیل مزرعی فراهانی(۸۸۵۱۱۴۲۸)

استادِ درس: جنابِ استاد اسلامی

راهنَما : جنابِ استاد واحدی

بهارِ ۱۳۹۱

فهرست مطالب

چکیده ۳

مقدمه ۴

بمبِ فوتونی ۶

لیزرها یِ تصادفیِ همدوس ۹

میکرولیزرهایِ تصادفی ۱۱

کاربردها ۱۴

مراجع ۱۶

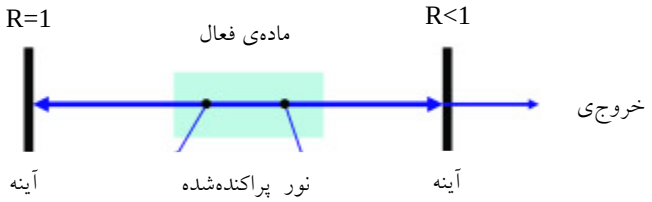
چکیده

تفاوت لیزرِ تصادفی با انواع دیگر از لیزرها بیشتر به این خاطر است که کاواکِ آن نه تنها از آینه‌ها تشکلیل نشده‌است، بل‌که بوسیله‌ی پراکنده‌گی های متعدد فوتون اولیه در یک ماده‌ی‌فعال با آرایش اتم‌ی بی‌نظم شکل گرفته است.

در طیّ دهه‌ها ی گذشته، لیزرها ی تصادفی علاقه‌ی زیاد و بجایی را در بین محققان و پژوهش‌گران به وجود آورده که این بخاطرِ ویژگی‌ها یی از این نوع لیزر است که منجر به کاربردها ی منحصر بفردِ آن می‌شود.

مقدمه

لیزرها کاربردها ی گسترده‌ای در صنعت، پزشکی و زمینه‌ها ی دیگری در زنده‌گی معاصر پیدا کرده‌اند. اجزاءِ اصلی یک لیزر عبارت‌ست از ماده‌ای که(ماده‌ی‌فعال)بر اثر یک نشر تحریکی، نور را تقویت کرده و هم‌چنین کاواکی که نور را در داخل ماده‌ی‌فعال برای تقویت بیش‌تر آن، بدام می‌اندازد. ماده‌ی‌فعال بوسیله‌ی یک منبع جریان الکتریکی یا یک منبع اپتیکی (مثلن لیزر دیگر و یا حتا لامپ) پمپ می‌گردد.



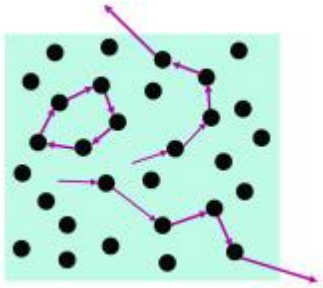
شکل ۱– (الف) نمودار کاواک لیزر فابری–پرو که از دو آینه و یک ماده‌ی‌فعال بین آن‌ها تشکیل شده است. ضریب باز تاب آینه‌ی سمت راست کم‌تر از یک است($R<1$) و بنابراین به‌صورت جزئی نور را عبور می‌دهد. نقاط سیاه، نشان‌دهنده‌ی مراکزی‌ست که نور لیزر در آن‌جا پراکنده شده و از کاواک خارج می‌شود.

متداول‌ترین نوع کاواک لیزری، کاواک فابری–پرو می‌باشد که از دو آینه(که یکی بصورت جزئی نور را عبور می‌دهد)تشکیل شده‌است. به این صورت که هر دو آینه در مقابل یک‌دیگر و در دوطرف ماده‌ی‌فعال قرارگرفته‌اند(شکل ۱–الف). نوری که در بین دو آینه بدام می‌افتد، در هر رفت و برگشت‌ی که در درون ماده‌ی‌فعال انجام می‌دهد، تقویت می‌شود. این نور بوسیله‌ی آینه‌ای که بصورت جزئی نور را عبور می‌دهد از کاواک خارج شده و نوری که به داخل کاواک برمی‌گردد؛ بعد از یک دور رفت و برگشت بین دو آینه به‌صورت سازنده تداخل کرده و به موقعیت اولیه‌ی خود برمی‌گردد. بدین‌معنا که تئخیر فاز یک رفت و برگشت نور بایستی مضرب صحیحی از 2π باشد؛ و این شرط لازمی‌ست که فقط در فرکانس‌ها ی مشخص اتفاق می‌افتد. در چنین فرکانس‌ی،که فرکانس تشدید کاواک نام دارد؛ حداقل نور از آینه‌ی جزئی‌گذرده می‌گذرد و قسمت عمده‌ی نور برای یک دوره‌ی زمانی در کاواک باقی می‌ماند. وقتی که تقویت اپتیکی سیستم به اندازه‌ای قوی باشد که بتواند نشتی حاصل از یک آینه و جذبی که توسط مواد صورت می‌گیرد را جبران کند، لیزر در فرکانس‌ی که منطبق بر فرکانس تشدید کاواک است، ایجاد می شود.

نور لیزری که از آینه‌ی جزئی‌گذرده عبور می‌کند؛ فرکانس مشخص، جهت‌گیری خوب و درجه‌ی بالایی از همدوسی دارد. اگر به هر دلیلی پراکنده‌کننده هایی در داخل کاواک وجود داشته باشد، نور می‌تواند در جهت‌های دیگری هم پراکنده شود که باعث یک هدررفته‌گی اضافی بصورت جذب در محیط و هم‌چنین افزایش یافتن آستانه‌ی ایجاد لیزر[1] است. این همان علتی است که پراکنده‌گی اپتیکی را به عنوان یک عامل مضر می‌دانیم و هم‌چنین عاملی‌ست که مهندسان برای به حداقل رساندن‌ش، به‌سختی تلاش می‌کنند.

[1] شرایطی که در آن لیزر در ماکسیمم شدت ایجاد می‌شود.

حال سئال این‌جاست که وقتی پراکنده‌گی خیلی شدید می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟ واقعن تعجب‌آور است که پراکنده‌گیِ شدیدِ نوری می‌تواند ایجاد لیزر را تسهیل کند! ماده‌یِ‌فعال‌ی را در نظر می‌گیریم که شامل تعدادی از مراکزِ پراکنده‌گی‌ست(شکل۱–ب): نور قبل از اینکه از ماده‌یِ‌فعال خارج شود بارها پراکنده می‌شود. پراکنده‌گی‌هایِ متعدد زمانِ اقامتِ نور و طول مسیرش را در ماده‌یِ‌فعال افزایش داده و نور را بیش از پیش تقویت می‌کند. بنابراین در این نوع از تولیدِ لیزر، دیگر نیازی به آینه‌ها برایِ بدام انداختنِ نور نیست؛ چرا که پراکنده‌گی به‌صورت خودبه‌خودی، کارِ آینه ها را انجام می‌دهد. از آن‌جا یی که پراکنده‌گی قویِ نور، معمولن در مواد ی که آشفته‌گی زیاد و آرایشِ نامنظمی دارند اتفاق می افتد، کلمه‌یِ "تصادف‌ی" برایِ توصیف لیزر هایی که بر پایه‌یِ چنین مشخصات و ویژه‌گی هایی عمل می‌کنند استفاده شده است.



شکل ۱–(ب) پراکنده‌گی‌ها یِ متعدد، زمانِ اقامت نور و طول مسیرش را در ماده‌یِ فعال افزایش داده و نور را بیش از پیش تقویت می‌کند. بازپراکنده‌گیِ نور جریان یافته؛ باعثِ شکل‌گیریِ یک مسیرِ بسته‌یِ چرخه‌مانند برای نور می‌شود.

در ادامه‌یِ مقاله، چگونه‌گیِ عمل‌کرد لیزر های تصادفی، ویژه‌گی هایی که این نوع لیزر را از انواعِ متداول متمایز می‌کند و هم‌چنین کاربردِ این نوعِ خاص از لیزر شرح داده می‌شود.

بمبِ فوتونی

در سال ۱۹۶۶ گروه‌ی که بوسیله‌یِ یک‌ی از پیش‌گام‌انِ عرصه‌یِ لیزر و دارنده‌یِ جایزه‌ی نوبل،ان‌جی‌باساو[۱]، سرپرست‌ی می‌شد؛ با جای‌گزین کردن یکی از آینه‌ها یِ لیزر فابری-پرو با یک سطح پراکنده‌کننده، یک نوع جدید از انواع کاواک لیزر را ساختند که دست‌رس‌ی به فیدبک‌هایی را میسر می‌ساخت که غیرتشدیدی هستند. بدین‌معنا که نور از رویِ مسیری که یک‌بار عبور کرده باز نمی‌گردد. نور در داخل کاواک دست‌خوشِ پراکنده‌گی‌ها یِ متعدد می‌شود و از آن‌جا یی که در هربار پراکنده‌شدن جهت‌ش تغییر می‌کند، بعد از یک دور کامل به موقعیتِ اولیه‌اش باز نمی‌گردد. درچنین کاواک‌ی، تشدیدها یِ فضاییِ میدانِ الکترومغناطیس‌ی[۲] حضور ندارند و مدتِ اقامتِ نور در ماده‌یِ‌فعال به فرکانس وابسته نیست. در چنین لیزری، فیدبک به‌صورتِ ساده‌ای برای برگرداندنِ مقداری انرژی یا فوتون به ماده‌یِ‌فعال استفاده می‌شود. بدین‌معنا که این فیدبک؛ از نوعِ انرژی و یا شدت است. از آن‌جا یی که در لیزری با فیدبکِ غیرِ تشدیدی، تنها عنصرِ تشدید خطِّ تقویتِ ماده‌یِ‌فعال است، میان‌گینِ فرکانسِ تابش‌ی نه تنها وابسته‌گی به ابعادِ کاواک لیزر ندارد؛ بل‌که تنها به مرکزِ فرکانسِ خط تقویت وابسته است. اگر فرکانس به اندازه‌یِ کافی مداوم و ثابت باشد، تابش یک فرکانسِ میان‌گین پایدار خاهد داشت که می‌تواند به‌عنوان تولید یک استاندارد اپتیک‌ی برایِ طول و فرکانس استفاده شود.

در سال ۱۹۶۸، لِتُخُو[۳] هنگامی که مدلِ خودمولدیِ نور را در یک ماده‌یِ‌فعال که مملو از پراکنده‌کننده‌ها بود پیش‌نهاد داد؛ تحقیقات را فراتر از این بُرد. فوتون‌ها به‌صورتِ خودبه‌خودی از اتم‌ها یِ برانگیخته و یا مولکول‌ها یِ درونِ ماده‌یِ‌فعال که پراکنده‌گی هایِ متعدد را تجربه کرده‌اند و دست‌خوشِ ول‌گشت قبل خروج از ماده‌یِ‌فعال شده‌اند، ساتع می‌شوند. هم‌زمان که فوتون‌ها داخلِ ماده‌یِ‌فعال سیر می‌کنند، می‌توانند فوتون‌ها ی دیگر را به تابش‌ها یِ تحریک‌ی وادار کنند.

دو مقیاسِ طولِ مشخصه که توسط لِتُخُو پیش‌نهاد داده شد، در این طرح گنجانده شده است. یک‌ی مسیرِ تولید(L_{gen})[۴] که عبارت‌ست از فاصله‌یِ میان‌گین‌ی که یک فوتون قبل از تولیدِ تابش از فوتونِ دیگر طی می‌کند و دوم‌ی میان‌گینِ فاصله‌یِ مسیر(L_{pat})[۵] که یک فوتون قبلِ خارج شدن از ماده‌یِ فعال طی می‌کند. هرچه پراکنده‌گی بیش‌تر باشد، میان‌گینِ فاصله‌یِ مسیر(L_{pat}) طولانی‌تر است. هنگامی که L_{pat} از L_{gen} بیش‌تر می‌شود، هر فوتون‌ی قبل از خارج شدن از ماده یک فوتونِ دیگر تولید می‌کند. این سلسله‌یِ واکنش‌ها زنجیروار ادامه می‌یابد؛ بدین‌صورت که یک فوتون دو فوتون تولید می‌کند، و این دو فوتون چهار فوتون و... . تعدادِ فوتون‌ها با

---

۱ N. G. Basov

۲ شامل تشکیل مدهای تشدیدی در لیزر درون کاواک فابری-پرو می‌باشند.

۳ Letokhov

۴ Generation length

۵ Mean path length

گذشتِ زمان افزایش می‌یابد. بدین‌سان، $L_{pat} = L_{gen}$ که مرتبط است با شروعِ خودمولّد یِ فوتون. از آن‌جا یی که مراحلِ زایشِ فوتون متشابه است با مراحل زایشِ نوترون در یک بمبِ اتمی، روش‌ی که توسط لِتُخُو پیش‌نهاد داده شده بود، ملقَّب به"بمب‌ها یِ فوتون‌ی" شد.

نزدیک به بیست سال بعد از پیش‌گام بودنِ لِتُخُو در این زمینه، تابش‌ها یِ تحریک‌یِ قوی در گستره‌یِ وسیع‌ی از انواعِ پودر هایِ کریستال‌ی[1] که بعنوان ماده‌یِ‌فعال لیزر استفاده می‌شود؛ مشاهده شده است. برایِ مثال پودرِ شیشه‌ی آمیخته با نئودیمیُم و پودرِ یاقوت آمیخته با تیتانیم. هنگامی که این پودر ها بوسیله‌یِ پالس‌ها یِ لیزر پمپ می‌شوند، تابش‌ها یِ آنی و لحظه‌ای از پودرها در مقایسه با آستانه‌یِ پمپ، شدیدن کوتاه می‌شوند، و بنابراین باریک شدنِ طیف خطوط تابش‌ی اتفاق می‌افتد. با پمپ کردنِ بیش‌تر، تابش از خود نوسانات میرا شونده‌ای را نشان می‌دهد. چند توضیح برایِ توجیه این پدیده پیش‌نهاد شده‌است. اولین پیش‌نهاد این است که شدتِ تابشِ تحریک‌ی وابسته به نحوه‌یِ انتشار نور در پودر است. بعبارتِ به‌تر، فوتون‌هایی که بصورتِ خودبه‌خود توسط یون‌ها یِ نئودیمیم و یا تیتانیم گسیل شده‌اند، قبل از خارج شدن از پودر به دفعات از یک ذره به سمت ذره یِ دیگر جَست می‌کنند. پیش‌نهادِ دیگر این است که پراکنده‌گیِ متعدد باعث افزایشِ شانس فوتون‌ها برایِ برخورد با یون‌ها یِ برانگیخته و ایجادِ یک تابشِ تحریک‌ی می‌شود.

هم‌چنین گفته شده در پودر ی که اندازه‌یِ ذرات‌ش بزرگ‌تر از طولِ موجِ تابش‌ی است، نور مابینِ ذراتِ منفردِ به دلیلِ بازتاب‌ها یِ سطح‌ی بدام می‌افتد. در این طرح، به پودر به عنوان یک مجموعه‌یِ آماری از میکروکاواک هایِ کوپل شده‌یِ اپتیک‌ی توجه شده و نشان داده شده که ایجاد لیزر در مُدها یی رخ می‌دهد که توسط بازتاب‌ش های کلیِ داخلی در سطوحِ دانه های منفرد و یا دسته‌ها یی از آن‌ها شکل می‌گیرند. در نهایت در حالت‌ی که مقدار یون‌ها یِ فعالِ آمیخته کم باشند،کاهش شدت تابش‌ی نتیجه‌ای‌ست از فوقِ تشعشع یا فوق‌شفافیت. به‌معنای هم‌گام سازیِ تابش‌ها یِ خودبه‌خود یِ یون‌ها برانگیخته.

در سالِ ۱۹۹۴ لاوندی[2] و هم‌کاران ش تابش‌ها یِ لیزرگونه از محلولِ متانولِ دارایِ رنگ‌دانه هایِ رودامین‌پرکلرات۶۴۰[3] و میکروذراتِ تیتانیُم‌دی‌اکسید را گزارش داد که در این‌جا برخلافِ ماده‌یِ فعال بصورت پودر، ماده‌یِ‌فعال(رنگ‌دانه هایِ مولکول‌ی)و عناصرِ پراکنده‌کننده(میکروذرات) در مایعِ مورد بررسی از یک‌دیگر جدا شده‌اند. در واقع در این مدل تقویتِ اپتیک‌یِ خارج از پراکنده‌کننده ها اتفاق می‌افتد. اندازه‌یِ ذرات منفرد حدودن یک‌چهارمِ میکرومتر هستند که برای بدام انداختن نور بسیار کوچک هستند و بنابراین نمی‌توانند به‌عنوانِ کاواک‌ها یِ لیزری که نور را بدام می‌اندازند؛ عمل کنند.

---

۱ laser crystal powders

۲ Lawandy

۳ Rhodamine 640 perchlorate dye

شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی اطلاعات آزمایش‌گاه‌ی گروه تحقیقات‌ی کائُ[۱]ست که برای تکرار آزمایش اصلی لاوندی گردآوری شده‌است. طیف تابش‌ی به‌صورتِ غیرمعمولی در آستانه‌ی پمپ‌شدن باریک شده‌است(شکل۲-الف). شکل ۲-ب رُمبش پهنای‌خط تابش‌ی را نشان می‌دهد. در شکل۲-پ نمایش ورود ی-خروج‌ی ماکسیمم شدت تابش‌ی دربرابر انرژی پمپ نیز چنین تغییری را در همان آستانه‌ی پمپ‌شدن نمایش می‌دهد. این رفتار آستانه‌ای وجود فیدبک‌ها را پیش‌نهاد می‌دهد. خط طیفی نسبتن پهن و فاقد مشخصه بالاتر از آستانه؛ نشان‌دهنده‌ی این است که فیدبک غیر حساس به فرکانس بوده و یا غیر تشدیدی می‌باشد. به‌صورت آزمایش‌گاه‌ی دیده شده‌است زمان‌ی که چگالی ذرات پراکنده کننده از 5×10^{9} به 2.5×10^{12} در سانتی‌مترمکعب در ماده‌ای که غلظت رنگ‌دانه ها 2.5×10^{-3} مولار می‌باشد، افزایش می‌یابد؛ آستانه بیش از دو مرتبه‌ی بزرگ‌ی کاهش می‌یابد. وابسته‌گی شدیدی که آستانه به چگالی پراکنده‌کننده ها دارد نشان‌دهنده‌ی این است که فیدبک با پراکنده‌گی متناسب است.

حال سئال این‌جاست که پراکنده‌گی چگونه باعث رُمبش پهنای خط تابش می‌شود؟ وقتی یک پالس پهن فضایی، به یک سلول رنگ برخورد می‌کند، یک ناحیه‌ی تقویت‌کننده‌ی دیسک‌مانند در سوسپانسیون در دهانه‌ی ورودی سلول تشکیل می‌شود. فوتون‌ها ی گسیل شده علاوه بر این‌که به راحتی می‌توانند از ناحیه‌ی تقویت‌ی خارج شوند، از دهانه‌ی ورودی گذر کرده و به مناطق عمیق‌تر در داخل ناحیه‌ی پمپ‌نشده سوسپانسیون نفوذ کنند. بعد از چندین پراکنده‌گی(یا همان ول‌گشت)در ناحیه‌ی غیرپمپ‌ی، برخی از فوتون‌ها به همان حجم ماده‌ی‌فعال تحریک شده بازگشته و تقویت می‌گردند. این بازگشت همان فیدبکِ انرژی مورد نظر ماست.

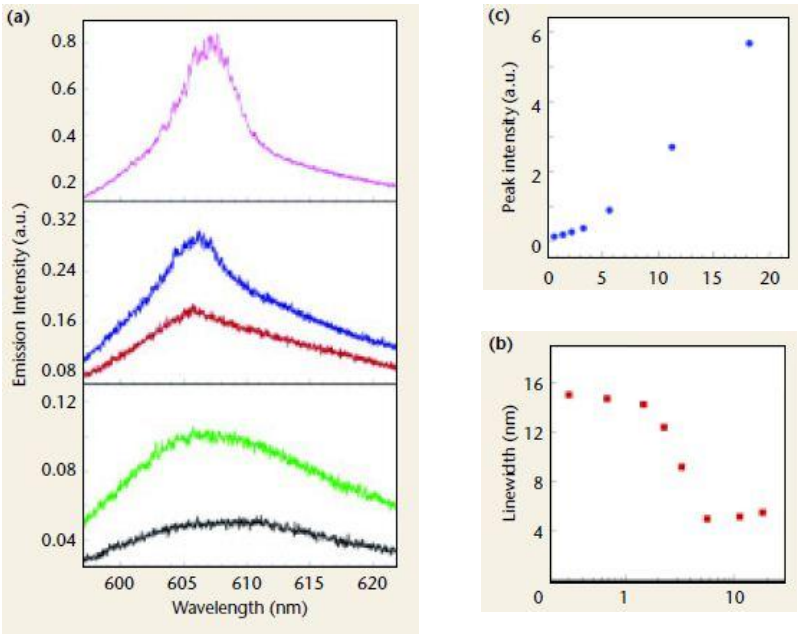
هنگامی که پراکنده‌گی شدیدتر می‌شود، احتمال بازگشت هم بیش‌تر می‌شود، بنابراین فیدبک هم قوی‌تر می‌شود. از آن‌جایی که احتمال بازگشت کم‌تر از ۱۰۰درصد است، فیدبک هم ناکامل است و بنابراین افت می‌کند. آستانه‌ی ایجاد لیزر با وضعیت‌ی که نرخ اتلاف فوتون با نرخ تولیدش در ناحیه‌ی تقویت به تعادل رسیده‌است، رابطه دارد. نرخ تولید فوتون به بیش‌ترین مقدار خود در بیشینه‌ی طیف بهره می‌رسد در حالی که نرخ اتلاف فوتون تقریبن مستقل از فرکانس است. هم‌چنان که نرخ پمپ کردن افزایش می‌یابد، اولین بار این نرخ تولید فوتون است که در بیشینه‌ی طیف بهره برابر نرخ اتلاف فوتون می‌شود، در صورتی که در خارج از این ناحیه‌ی فرکانس‌ی، نرخ تولید فوتون همچنان کم‌تر از نرخ اتلاف‌ش است. تحت این شرایط، چگالی فوتون‌ی در حوالی فرکانس بیش‌ترین بهره سریعن افزایش می یابد. افزایش ناگهانی چگالی فوتون‌ی در نزدیک پیک طیف بهره، منجر به رُمبش پهنای خط تابش می‌شود.

توجه داشته باشید که فیدبک‌ی که معلول پراکنده‌گی های متعدد است؛ غیر تشدیدی و ناهمدوس است. بدین‌معنا که نور بازگشت‌ی آن، به جای بازگشت به موقعیت اولیه‌ی آن فقط به حجم ماده‌ی‌فعال برمی‌گردد؛ به‌همین دلیل از فاز نور پراکنده شده صرف‌نظر می‌کنیم. این نوع لیزر را لیزرتصادف‌ی با فیدبک غیرتشدیدی و یا

---

۱ Hui Cao

ناهمدوس می‌نامیم. هم‌چنین این نوع لیزر را لیزرِ رنگ‌فوتونی نامیده‌اند.



شکل ۲–(الف) طیف تابشی محلولِ متانولِ دارایِ رنگ‌دانه هایِ رودامین‌پرکلرات۶۴۰ و ذرات نانویِ روی‌دی‌اکسید. سوسپانسیون به وسیله یِ هماهنگ دوم پالس لیزرِ Nd:YAG، (λ = 532 nm, pulsewidth = 35 ps, repetition rate = 10 Hz). پمپ می‌شود. انرژی پالس‌ها یِ ورودی پمپ به ترتیب از بالا به پایین : 0.68, 1.5, 2.3, 3.3, 5.6 µJ. غلظت رنگ‌دانه ها 5 mM per liter می‌باشد. چگالیِ ذرات روی‌دی‌اکسید: 3×10^{11} cm^{-3}. میانگینِ قطر ذرات : 100 nm

شکل ۲–(ب) پهنای طیف تابشی به عنوان تابعی از انرژی ورودی پالس پمپ کننده

شکل ۲–(پ) شدت در پیکِ طیف تابشی دربرابر انرژی ورودی پالس پمپ کننده

کارِ لاوِندی و هم‌کاران ش بسرعت باعث انجام بسیاری از آزمایش‌ها و پژوهش‌ها یِ نظریِ در زمینه‌یِ لیزر تصادفی با فیدبک غیرتشدیدی شد. لیزر تصادفی در برخی مواد مانند: پلی‌مرها، کریستال‌ها یِ مایع و حتا بافت‌هایِ زیست‌ی یافته شده‌اند. گروه آر.آر آلفانو[۱] رفتارها یِ لیزری را با تزریق رنگ دانه در پاهایِ جوجه و قلبِ خوک گزارش داده‌اند. از آن‌جا یی که در بافت‌ها یِ حیوانات پراکنده‌گیِ قوی وجود دارد، پژوهش‌گران تنها به دنبال تزریق کردن مولکول‌هایِ رنگ‌دانه در بافت‌ها و پمپ کردنِ آن‌ها برایِ تدارک کردنِ بهره‌یِ اپتیک‌ی هستند.

لیزرها یِ تصادفیِ همدوس

چند سالِ پیش، کائُ یک نوع متفاوتی از فرآیند ایجاد لیزر در نیم‌رسانا ها با ساختار نانو که بشدت بی‌نظم‌اند را گزارش داد: درمقابل لیزرتصادفی ای که در بخش‌ها یِ قبل توضیح داده شد؛ فیدبک این نوع لیزر، همدوس و تشدیدی است. گروه زِ.و.واردِنی[۲] نیز چنین پدیده‌یِ مشابه‌ی را در پلی‌مر هایِ بشدت بی‌نظم و مواد آلی و مئثر در

۱ R. R. Alfano

۲ Z.V.Vardeny

بافت‌ها یِ آلی[1] هم مشاهده کرده است. این نوع از لیزر، که فیدبک‌ش همدوس و تشدیدی‌ست، لیزر تصادفیِ همدوس نامیده می‌شود. برایِ این‌که تفاوت این نوع از لیزر را با یک لیزر تصادفی تشدیدی نشان دهیم، یا حتا لیزر ناهمدوس، به‌تر است به ستون‌ها یی در ابعاد نانو از جنسِ روی اکسید توجه کنیم.

روی اکسید(ZnO) یک نیم‌رسانا با گافِ انرژی زیاد است که نور را در ماورایِ‌بنفشِ نزدیک[2] ساتع می‌کند. شکل ۳–الف یک تصویر پویشِ‌ی میکروسکوپ الکترونی از ستون‌هایِ نانو از جنس روی اکسید است که در زیرلایه‌یِ یاقوتی توسط فرآیند MCVD[3] رشد یافته است.

نانو ستون‌ها از لحاظ ارتفاع هم‌اندازه و بصورت تصادفی در رویِ زیرلایه مستقر شده‌اند. میانگینِ قطر یک میله 50 nm است. برای بدست آوردنِ بهره‌یِ اپتیکی، فرکانسِ سه‌گانه‌یِ خروجیِ یک پالسِ لیزرِ Nd:YAG؛(λ = 532 nm, pulsewidth = 35 ps, repetition rate = 10 Hz).) باید بوسیله‌یِ یک لنز به داخل نانومیله‌ها تمرکز یابد. نانو میله‌ها هم به عنوان ماده‌یِ‌فعال و هم به‌عنوانِ عناصر پراکنده‌کننده عمل می‌کنند. شکل ۳–پ نشان‌دهنده‌یِ طیف تابش‌یِ یک آرایه‌ای از نانومیله‌هایِ روی‌اکسید می‌باشد. در پمپاژها یِ سطوح پایین، طیف یک تابش یک پیکِ نشری خودبه‌خودی به پهنای 12nm را نشان می‌دهد. هنگامی که شدت پمپاژ به بیش از یک آستانه‌یِ مشخص رسید؛ پیک‌هایِ باریک و گسسته بر بالایِ پهنایِ پیک نشریِ خودبه‌خودی ظاهر می‌شوند. پهنای خط این پیک‌ها کم‌تر از 0.2 nm می‌باشد، که خیلی کم‌تر از پهنایِ پیک تابش خودبه‌خودی‌ست. هنگامی که شدت پمپاژ بیش‌تر افزایش می‌یابد، پیک‌هایِ باریکِ بیش‌تری ظاهر می‌شوند. فرکانس های پیک‌هایِ گسسته وابسته به موقعیت‌هایِ نمونه هستند. زمانی که یک قسمت متفاوت از نمونه پمپ می‌شود، فرکانس پیک تغییر می کند. این نتیجه پیش‌نهاد می‌دهد که پیک‌های طیفی گسسته نتیجه‌ای‌ست از تشدیدهای فضایی برای نور که بوسیله ی پیکربندی محلی نانومیله هایِ روی اکسید تعیین می شوند.

آرایه‌یِ نانومیله های روی اکسید یک سیستم پراکنده‌کننده‌یِ دوبعدی است. بدین‌معنا که نور در صفحه ای که عمود بر میله هاست بوسیله ی نانو میله ها پراکنده می شود. بعد از پراکنده گی های متعدد، نور می تواند قبل از این‌که یک مسیر بسته را شکل دهد به نانومیله‌ای که از آن پراکنده شده بازگردد. این پردازش را پراکنده گی نور برگردنده می‌نامند.(چرخه را در شکل ۱–ب ببینید.) وقتی که تقویت اپتیکی در طول چرخه بیش‌تر از اتلاف شد؛ نوسان های لیزری در یک چرخه که به عنوان کاواک فعالیت می کنند اتفاق می افتد. همانند یک لیزر حلقه ای[4]، فرکانس های لیزری بوسیله ی موقعیتی که تئخیر فاز در طول چرخه‌ی بسته مساوی می شود با ضریب صحیحی از 2π تعیین می شوند. این نوع روشِ ایجاد لیزر که با توسط پراکنده‌گی نور برگردنده در یک تک‌مسیر ایجاد می‌شود، خلاقانه و در عین حال قابل درک است. اما تا حدی ساده سازی شده است: در واقع نور می تواند به

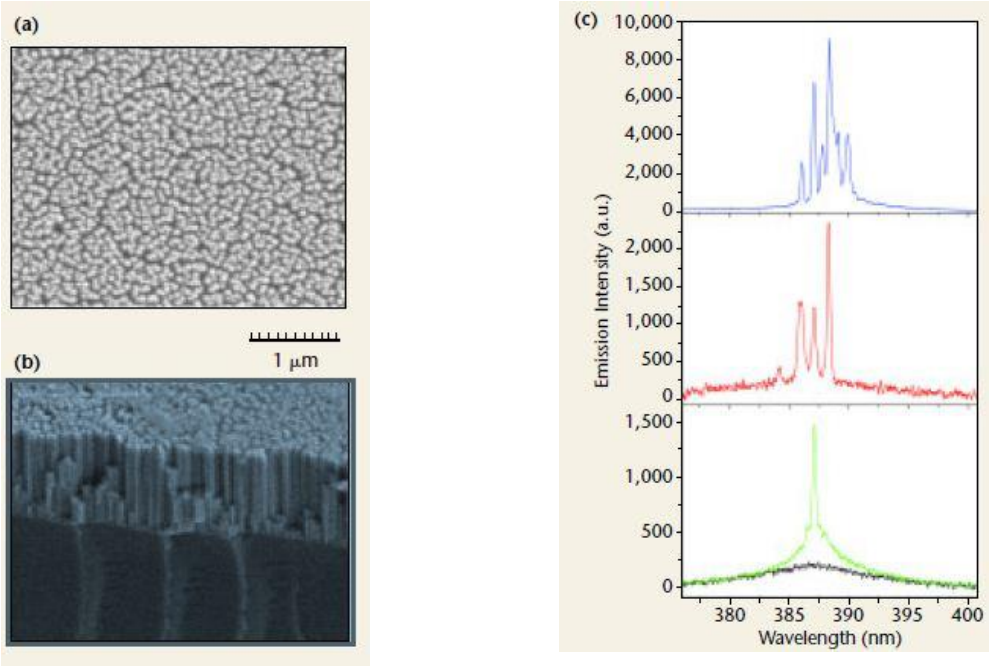
[1] Organic material

[2] Near UV

[3] Metalorganic chemical vapor deposition

[4] Ring Laser

موقعیت اصلی خودش از بین مسیرهای متفاوت برگردد. از آن‌جایی که همه ی امواج برگشت‌شده‌یِ پراکنده شده تداخل می کنند، فیدبک، یک میدان(یعنی دامنه‌ی میدان)است! تنها در فرکانس های مشخصی تداخلِ بصورت سازنده رخ می‌دهد که باعث تقید نور در داخل سیستمِ تصادفی می شود. ایجاد لیزر در این فرکانس ها اتفاق می‌افتد که پیک های گسسته در طیف تابشی ایجاد می کند. بالای آستانه‌ی ایجاد لیزر؛ سرعت افزایش شدت تابش خیلی بیش‌تر از شدت پمپاژ می باشد، در حالی که طول پالس تابشی از ۲۰۰ ps تا نزدیک ۲۰ ps کاهش می یابد. در آزمایش شمارش فوتون‌ها، ما اثبات می کنیم که تابش لیزری از آرایش تصادفی نانومیله های روی اکسید؛ همدوس هستند. به‌هیچ وجه بدیهی نیست که می‌شود از آرایه‌ای غیر منظم و تصادفی نور همدوس تولید کرد.



شکل ۳–(الف)و ۳–(ب) پویش ریزنگار الکترونی نانومیله های روی اکسید که در یک زیرلایه ی یاقوت رشد کرده اند.

شکل ۳–(پ) طیف تابشی نانومیله های روی اکسید وقتی که قدرت پمپ ورودی (از پایین به بالا) .3.2, 4.5, 6.1, 7.0 and 11.1 μJ/cm2 می‌باشد.

رفتار یک لیزر تصادفی که فیدبک همدوس دارد می تواند خیلی مشابهِ لیزر معمولی باشد، با این حال هنوز یک تفاوت مهم بین این دو نوع از لیزر وجود دارد. یک لیزر تصادفی خروجیِ جهت‌داری ندارد: به خاطر این‌که پراکنده‌گیِ بدست آمده از یک سیستم بی‌نظم و تحریک شده در جهت گیری کاملن تصادفی‌ست؛ خروجی چندجهته می‌باشد.

در نیم‌رساناهایِ با ساختارهای نانو، شکل‌گیری کاواک های لیزری ناشی از اثرات پراکنده‌گی و تداخلی است. این مکانیسم در ماده‌ی لیزری با پراکنده کننده های گسسته و آشفته‌گی‌هایِ قوی با بردِ کوتاه اعمال می شود. یک نوع متفاوت از کاواک لیزری می تواند به وسیله ی ناهمگنیِ ملایمِ بلند بُرد در ماده‌ای که به میزان اندک آشفته شده است، مثل پلی‌مرهایِ π–الحاقی و یا فیلم های آلی[۱] ژلاتینی با رنگ دانه افزوده شده آلاییده شده وجود داشته

[۱] Organic

باشد. نوسانات فضاییِ ضخامت فیلم، سبب ناهمسانی های بلندبردِ ضریب شکست می گردد. نور در یک ناحیه‌یِ با ضریب انکسار بالا بوسیله‌یِ بازتاب کلی داخلی در ناحیه ی مرزی این ناحیه بدام می افتد. کاواک های لیزریِ معمول خیلی بزرگ هستند، مثلن از مرتبه یِ صدها میکرومتر!

میکرولیزرهایِ تصادفی

پراکنده گی قوی می تواند برای تولید میکرولیزرها که از اجزاء اصلیِ مدارهایِ مجتمع فوتونی هستند، به کار رود. مسئله‌ی اصلی در ساخت میکرولیزر، محدود کردن نور به یک حجم کوچک با ابعادی از مرتبه‌ی یک طول موج اپتیکی است. میکرولیزرهای مختلفی در طول دو دهه یِ اخیر ساخته و گسترش یافته اند. در سطح عمودی کاواک، که تابش کننده ی لیزر است، نور بین دو بازتابنده‌یِ براگ که با فاصله یک یا دو طول موج از یکدیگر جدا شده اند، به جلو و عقب حرکت می کند.[1] لیزر میکرودیسک ، از بازتابش کلی داخلی در لبه‌یِ دیسک با ضریب شکست بالا برای محدود کردن نور در یک مسیر بسته نزدیک لبه‌ی دیسک استفاده می کند. در یک گستره‌ی فوتونیِ دوبعدی که حالت لیزر را ترک می‌کند، محدود کردن نور توسط پراکنده‌گیِ براگ در یک ساختار پریودیک به انجام می رسد. لازمه‌یِ ساختِ این میکرولیزرها یِ به دقت پیکربندی شده، رشدِ حالات کریستالی مصنوعی و تسهیلِ امکانات ساخته در ابعاد میکرو است. در سال ۲۰۰۰، کائُ و همکارانش نشان دادند که میکرولیزر ها می‌توانند از مواد آشفته نیز ساخته شوند. پراکنده‌گی قوی در ماده‌ی تصادفی راه دیگری برای محدود کردن نور بجهت تولید میکرو لیزر است. این نحوه‌ی تولیدِ یک میکرولیزر تصادفی آسان‌تر و ارزان‌تر است از راه های دیگر؛ این راه ساخت لیزر را حتا بوسیله‌ی یک سری از واکنش های شیمیایی در لیوان آزمایشگاه یا در یک بشقاب گرم، ممکن می سازد.

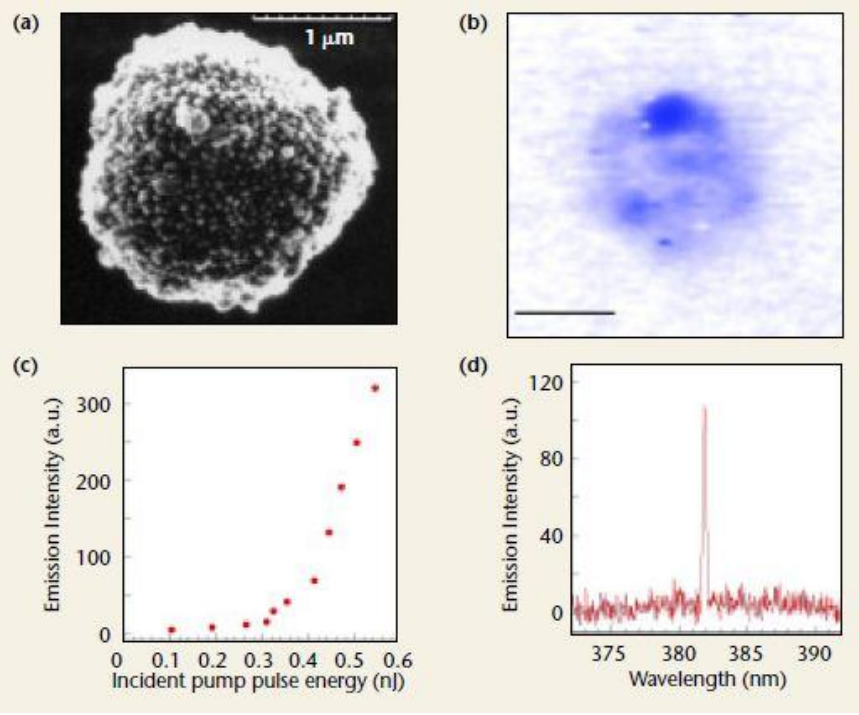
کائُ اخیرن یک میکرولیزر تصادفی از نانو ذرات روی‌اکسیدِ بسته بندی شده و بهم نزدیک ساخته است. مراحل تولید بسیار ساده است: اضافه کردنِ مقداری نمکِ روی(روی استات دی‌هیدرات)به یک حلال(دی‌اتیلن گلیسیرول). هنگامی که محلول تا دمای ۱۶۰ درجه ی سانتی‌گراد گرم شود، نانوکریستال هایِ روی‌اکسید به سرعت ته‌نشین شده و در دسته هایی به اندازه یِ 1-2μm با هم یکی می شوند. میلیون ها دسته به صورت مشابه همزمان در محلول شکل می گیرند. اندازه‌یِ دسته‌ها بوسیله‌ی تغییر در نرخ گرم شدن محلول کنترل می شوند. شکل ۴-الف یک دسته‌یِ با اندازه‌یِ 1.7μm را نشان می‌دهد. این ذره تقریبا ۲۰۰۰۰ نانوکریستالِ روی‌اکسید با قطر 50 nm را شامل می شود. از انحلال این دسته ها جلوگیری به عمل آمده و آنها با فاصله هایی روی بستری از کوآرتز چینش می یابند.

آزمایش اپتیکی بر روی یک تک دسته انجام می شود. نانوذراتِ روی اکسید به وسیله ی هماهنگ چهارم پالسِ لیزر :ND:YAG؛(λ= 266 nm, pulsewidth = 25 ps, repetition rate = 10 Hz).) تحریک می شوند. نور پمپ کننده بر روی

[1] Bounce

یک تک‌بسته بوسیله‌ی لنز شیئی یک میکروسکوپ تمرکز می یابد. به طور همزمان طیف تابشی این بسته بوسیله‌ی طیف‌سنج اندازه گیری شده و تصویر توزیع فضاییِ شدت نور ساتع شده از سرتاسر بسته بوسیله‌ی یک دوربین سی‌سی‌دی تصویر می گردد. نور پمپ‌کننده بوسیله‌ی فیلتری که در جلوی دوربین کارگذاشته شده؛[1] بلوکه می‌شود. از ورود نور پمپ کننده به دوربین توسط فیلتر جلوگیری به عمل می آید.

در پمپ با شدت های پایین، طیف تابشی شامل یک پیک تابشی خودبه‌خودی پهن است. توزیع فضایی شدت تابش خودبه‌خودی از سرتاسر بسته یکنواخت است. وقتی که شدت پمپ از یک آستانه ای بیشتر می شود، یک پیک نوک تیز در طیف تابش‌ی پدیدار می شود(شکل ۴–ت). به طور همزمان نقاط روشن معدودی در تصویر توزیع نور ساتع شده در بسته ظاهر می شوند.(شکل ۴–ب) زمانی که شدت پمپ افزایش می یابد، دومین پیک نوک تیز در طیف تابش‌ی و هم‌چنین نقاط درخشان دیگری در تصویر توزیع نور ساتع شده ظاهر می شود. منحنی شدت تابش مجموع به عنوان تابعی از شدت پمپ کردن، یک تغییر در شیب در آستانه ای که متناظر است با شروع ایجاد لیزر در یک بسته‌ی میکرومتری نشان می دهد(شکل ۴–پ). در سطح پمپاژی که به طور مشخص در بالای آستانه قرار دارد، مجموع شدت تابش‌ی تقریبن به صورت خطی با شدت پمپاژ افزایش می یابد.



شکل ۴–(الف) پویش ریزنگار الکترونی از یک میکروبسته‌ی روی‌اکسید به صورت نانوکریستالی
شکل۴ –(ب) تصویر اپتیک‌ی توزیع نور ساتع شده در عرض بسته. پالس انرژی پمپ ورودی0.35 nJ می باشد.
شکل ۴–(پ) مجموع شدت طیف تابشی به عنوان تابعی از انرژی پالس پمپ ورودی
شکل ۴–(ت) طیف تابشی از بسته در پالس انرژی پمپ ورودی0.35 nJ

[1] Bandpass filter

محدود کردن نور در سه بعد در بسته با اندازه ی میکرومتری توسط فرآیند پراکنده گی های متعدد و تداخل موجی تحقق می یابد. فوتون هایی که به طور خودبه‌خودی در داخل بسته بوسیله‌ی روی‌اکسید ساتع می شوند نمی‌توانند به راحتی خارج شوند: آن ها قبلِ فرار از مرز یک بسته، هزاران بار از یک نانوکریستال به نانوکریستال دیگر رفت و برگشت انجام می دهند. درحینِ پراکنده‌گی های متعدد، نور بوسیله‌ی تابش تحریک‌ی تقویت می‌شود و ممکن است به مکانی که قبلن بوده است برگردد. تداخل تمام نورهای بازگشته هنگامی که سازنده باشد می‌تواند نشتیِ نور را از بسته به حداقل ممکن برساند. اما تداخل سازنده تنها در فرکانس های مشخصی به وقوع می‌پیوندد که با پیکربندی فضاییِ پراکنده کننده ها تعیین می گردد. این فرکانس‌هاست که پدیده‌ی لیزر در آن ها اتفاق می‌افتد.پودر نمونه‌ای که ساختارش متفاوت است، فاز نور پراکنده شده و همچنین آرایشِ فضایی نانوکریستال های روی‌اکسید نیز تغییر می کند. از این‌رو تداخل نور پراکنده شده در فرکانس های مختلف که ایجاد لیزر در آنها اتفاق می افتد سازنده است. بدین معنا که فرکانس های لیزری اثر انگشتی از ساختار تصادفیِ منحصر بفرد یک بسته‌ی مشخص هستند. به‌خاطر اینکه تحدیدِ اپتیک‌ی به وسیله‌ی بازتاب نور در سطح یک بسته ایجاد نشده و بوسیله‌ی پراکنده‌گی در داخل آن بوجود آمده است، ما می توانیم پدیده‌ی لیزری را در بسته هایی که شکل نا منظم و و سطح ناهموار دارند، بدست آوریم.

کاربردها

مکانیسم فیدبک بر پایه پراکندگی نور در یک لیزر تصادفی؛ کاربردهایی در تولید لیزرهایی در نواحی طیفی که عناصر بازتاب کننده ی کارا در دسترس نمی باشند، دارند. مانند لیزرهای پرتو ایکس و لیزرهای پرتوگاما. کاربردهای دیگر بوسیله‌ی ویژگی هایی لیزرهای تصادفی که شاملِ: هزینه‌ی کم برای تولید، طول موجِ عمل‌کردِ مشخصِ نمونه، اندازه‌ی کوچک، شکل قابل انعطاف و سازگاری لایه‌ها است.

یک نمونه از این کاربردها، رمزگذاری اسناد و برچسب مواد در هنگامی‌ست که فرکانس های لیزری امضاء یک ساختار رندم را نشان می دهند. میکرولیزرهای تصادفی می تواند به عنوان برچسب های اپتیکی[1] در پزشکی و مطالعات دارویی مورد استفاده قرار بگیرد. هنگامی که بسته های نانوذرات به اهداف پزشکی ضمیمه می شوند، موقعیت اهداف می تواند بوسیله‌ی نمایان کردن تابش لیزری از بسته‌ها تعقیب شود. بدلیل این‌که هر بسته از نانوذرات فرکانس لیزری منحصر بفرد خودش را دارد؛ ما می توانیم اهداف متفاوت را شناسایی کنیم.

خروجیِ مختلف‌الجهت یک لیزر تصادفی باعث می شود که برای استفاده در نمایش‌گرها به کار آید. یک لایه‌ی نازک از یک ماده‌ی تصادفی که با ساتع‌کننده ها آلاییده شده است، می تواند به عنوان روکش در قاب نمایش‌گر با شکل دلخواه مورد استفاده قرار گیرد. لیزرهای تصادفی می توانند خیلی سریع تر از LED ها بین دو وضعیت خاموش و روشن تغییر یابند و بنابراین می توانند برای ساخت نمایش‌گر های با سرعت بالا مورد استفاده قرار بگیرند. نمایش‌گرهای چندرنگی می توانند به وسیله ی به‌هم پیوستن ساتع‌کننده ها و یا با فرکانس های مختلف در داخل یک ماده ی تصادفی تولید شوند. شکل، انعطاف پذیری و سازگاری زیرلایه ها ی لیزر تصادفی می‌توانند در حوزه هایی که شاملِ خطوط تولید(تصویر پویشی یک ماشین برای بازبینی قسمت های تولید شده) ویا جست‌جو و نجات هواپیما و ماهواره های ساقط شده، کاربردهایی را داشته باشد.

بسیاری از لیزرهای تصادفی‌ای که تا به امروز می شناسیم، به صورت اپتیکی پمپ شده اند. برخی از کاربردها نظیر پنل های تخت، نمایش‌گرهای خودرو و نمایش‌گرهای سینمایی نیاز به پمپاژ الکتریکی دارند. اخیرن لیزرهایِ با موجِ پیوسته که به صورتِ الکتریکی پمپ شده اند در فلزهای نجیب(از۵۷ تا ۷۱ جدول نجیب‌ند یا نادرند) که توسط دی الکتریک نانوفسفر آلاییده شده‌اند، گزارش شده است. پمپاژ الکتریکی نسبت به پمپاژ اپتیکی بسیار با صرفه تر است، چرا که بیشتر نور پمپ کننده به جای جذب شدن در ماده ی تصادفی، پراکنده می‌شود.

در عرصه ی دارویی، لیزرهای تصادفی برای کشف تومورها و روشنایی–درمانی استفاده می شوند. گروه ز.و.واردِنی نشان داده است که بافت های انسانی پراکنده‌گی های قوی‌ای را ایجاد می کند و زمانی که یک محلول

[1] Optical tags: برچسبِ شناسایی عناصر بیولوژیکی

لیزری[۱] بر رویِ این بافت‌ها تمرکز پیدا می کند، می تواند لیزر تصادفی تولید کنند. از آن‌جا یی که سلول های سرطانی ازسلول های معمولی خیلی سریع‌تر رشد می کنند، قطعات ریزِ زائدی را تولید می کنند. بی‌نظمی زیاد در بافت های بدخیم، باعث پراکنده‌گی قوی‌تر و کاراتر شدن پدیده‌ی لیزری می شود. می‌توان روش جدیدی را در نظر گرفت که در آن تومور ها بوسیله‌ی پویش یک شعاعِ لیزرِ تمرکز یافته بر روی عرض بافت بررسی می‌شوند: نور لیزر؛ سلول‌های رنگ‌دانه‌ی نفوذ کننده را به داخل ناحیه‌ی موضعی پمپ می کند؛[۲] زمانی که شدت پمپاژ زیاد نباشد، پدیده‌ی لیزری می تواند در محل موضعی تومور اتفاق بیفتد، جایی که پراکنده‌گی شدیدتر است. از آن جایی که پراکندگی در ناحیه ای کمتر از 1mm اتفاق می افتد، این امکان وجود دارد که توموری در حدود همین اندازه کشف شود.

لیزرهای تصادفی همچنین می توانند به عنوان عناصر فعال در وسایل نوری و مدارها استفاده شوند. برای مثال یک میکرولیزر تصادفی میتواند به عنوان یک منبع کوچک نور در یک کریستال فوتونی استفاده شود. بوسیله‌ی نفوذ دادن کریستال مایع در شیشه‌ی با منفذهای بزرگ، ویرزما[۳] و کاوالیری[۴] توانستند یک لیزر تصادفی قابل تنظیم با دما بسازند. چنین منبع نوری می تواند یک طیف رنگی قابل تنظیم با دما را ارائه دهد وانتظار می رود که کاربردهایی در فوتونیک، نمایش‌گر ها و صفحات حساس به دما، و حس‌گرهایِ دمایی راه دور پیدا شود.

مطالعه ی لیزرهای تصادفی به ما کمک می کند تا مِیزر[۵]هایِ کهکشانی و لیزرهای ستاره ای[۶] که لیزرهایی با فیدبک از طریق پراکندگی می باشند را درک کنیم.

---

[۱] محلول لیزر دهنده

[۲] Laser pumping

[۳] Wiersma

[۴] Cavalieri

[۵] میزر همان لیزر است که به‌جای light واژه‌ی microwave آمده؛ یعنی تقویت امواج ماکروویو توسط تابش تحریکی.

[۶] لیزرهایی که بین ستاره‌ها به‌وسیله‌ی نور ساطع شده از آن‌ها ایجاد می‌شود و در یک چرخه‌ی تقویت‌ی لیزر می‌دهد.

مراجع

1. R. V. Ambartsumyan et al., in Progress in Quantum Electronics, J. H. Sanders and K. W. H. Stevens, eds., Vol. 1, (Pergamon Press, London, 1970).

2. V. M. Markushev et al., Sov. J. Quantum Electron. 16, 281-3 (1986)

3. H. Cao, in Progress in Optics, E. Wolf, ed., Vol. 45, (North-Holland, Amsterdam,2003) and referencestherein

4. N. M. Lawandy et al., Nature 368, 436-8 (1994)

5. M. Siddique et al., Opt. Commun. 117, 475-9 (1995)

6. B. Li et al., Opt. Lett. 27, 394-6 (2002)

7. R. C. Polson and V. Vardeny, Appl. Phys. Lett. 85, 70-2(2000)

8. D. Wiersma, Nature 406, 132-5 (2000).

9. D. Wiersma, Nature 414, 708-9 (2001).

10. V. S. Letokhov, Amazing Light, R Y Chiao, ed.,(Springer, Berlin, 1996).