بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

بررسی جابجایی مد در لیزر تصادفی رامان با افزایش توان پمپ

میلاد ثانی[۱*]، محمود حسینی فرزاد[۱]، علیرضا بهرامپور[۲]، احسان شجاعی[۳]

۱-بخش فیزیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۲-دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۳-پژوهشکده لیزر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

چکیده - در این مقاله، یک مدل یک بعدی برای شبیه‌سازی لیزر تصادفی رامان ارائه می‌شود. این مدل از یک محیط چند لایه تشکیل شده است که لایه‌های این محیط به ترتیب دی‌الکتریک و محیط با بهره رامان هستند. تقویت درون این سیستم به وسیله لایه‌های با بهره رامان و طول‌های تصادفی تامین می‌شود. مدل مورد نظر با روش ماتریس انتقال و در حوزه فرکانس، مطالعه می‌شود. در این مدل‌سازی جابجایی مدها از سمت چپ و راست به سمت فرکانس مرکزی پهنای تقویت رامان با افزایش توان پمپ تابشی به سیستم، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

کلید واژه- لیزر تصادفی، محیط غیر خطی، اثر رامان.

Mode shift in Raman random laser by pump power increasing

Milad Sani[1*], Mahmod Hosseini Farzad[1], Alireza Bahrampour[2], Ehsan shojaie[2]

1-Physics Department of Shiraz University, Shiraz, Iran.

2-Physics Department of Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

3-Optic, Laser and Photonic Institute of Amirkabir University, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, a one-dimensional model is used to simulate the Raman random laser. This model is made of a multilayer system. The multilayer system consists of dielectric and Raman gain medium that are repeated alternatively. Amplification in this system is done by Raman gain medium with random length. Model is studied with the transfer matrix method in the frequency domain. In this simulation, mode pulling and mode pushing of the Raman random laser modes toward the center frequency of Raman line is analyzed with increasing the incident pump power.

Keywords: Random laser, Nonlinear medium, Raman effect.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

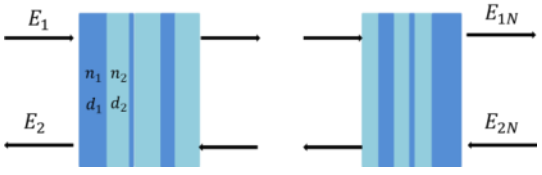
توسعه اخیر که در تولید مواد میکرو و نانو اتفاق افتاده است مسیر جدیدی را برای استفاده از این فناوری‌ها در تولید ساختارهای مفید اپتیکی باز کرده است. یکی از این ساختارها لیزرهای تصادفی هستند. در لیزرهای تصادفی با افزایش تعداد پراکننده‌ها، نقش کاواک (پس‌خوراند) توسط پراکندگی چندگانه در محیط‌های تقویت کننده انجام می‌گیرد. همین عدم نیاز به کاواک خارجی باعث سادگی تولید، قیمت پایین این نمونه از لیزر در مقابل لیزر معمولی می‌شود. علاوه بر این، کاربرد این لیزرها در ساخت صفحه‌های نمایش، تشخیص بافت‌های سرطانی، ساخت دماسنج‌های دقیق و غیره، بر اهمیت مطالعه ساختار و رفتار اپتیکی این لیزرها می‌افزاید.

معمولاً در محیط‌هایی با وجود نور همدوس با شدت بالا، اثرات غیرخطی به وجود می‌آیند . در لیزرهای تصادفی با افزایش چگالی پراکننده‌ها، نور در کاواک‌های محلی به دام می‌افتد. بنابراین بالا رفتن شدت (جایگزیدگی) نور در این کاواک‌های محلی باعث ایجاد اثرات غیر خطی می‌شود. وجود اثرات غیرخطی مانند اثر کر، رامان و غیره در لیزر، می‌تواند باعث تغییر مدهای لیزر، تغییر شدت خروجی لیزر و پدیده‌هایی مانند جابجایی فرکانس مدها، در بالای حد آستانه بشود که اهمیت بررسی اثرات غیر خطی در لیزرهای تصادفی را نشان می‌دهد[۲و۱].

۲- تئوری

۲-۱-مدل ماتریس انتقال در بررسی لیزر تصادفی

سیستم تصادفی مورد بررسی، سیستم یک بعدی با N لایه است. فاصله بین هر دو لایه d_j و ضریب عبور و ضریب انعکاس از هر لایه به ترتیب t_j و r_j در نظر گرفته می‌شود.که در آن d_j عددی تصادفی در نظر گرفته می‌شود. نمایی از سیستم یک بعدی مورد بررسی، در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: ساختار چند لایه‌ای لیزر تصادفی (لایه‌های رامان با ضخامت تصادفی در بین لایه‌های دی‌الکتریک)

ماتریس انتقال کل سیستم از حاصل‌ضرب ماتریس انتقال مربوط به هر لایه بدست می‌آید. که به ترتیب از یک لایه دی الکتریک و یک لایه ماده با بهره رامان بالا تشکیل شده است.

$$M_N = \left[\frac{1}{\prod_{i=1}^{N+1} t_i}\prod_{j=1}^{N}\begin{pmatrix} e^{-i\varphi_j} & r_j e^{i\varphi_j} \\ -r_j e^{-i\varphi_j} & e^{i\varphi_j}\end{pmatrix}\right]\begin{pmatrix} 1 & r_{N+1} \\ -r_{N+1} & 1\end{pmatrix} \qquad (۱)$$

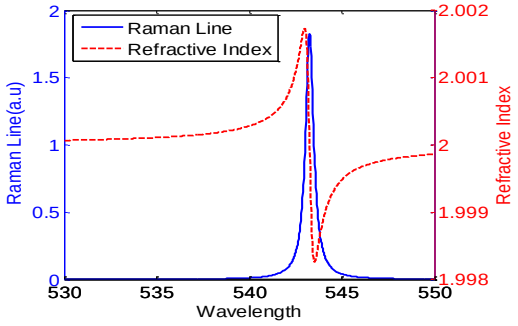
حال با کمک این ماتریس می توان E_{1N} و E_{2N} را به E_1 و E_2 مربوط کرد.

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2\end{pmatrix} = M_N \begin{pmatrix} E_{1N} \\ E_{2N}\end{pmatrix} \qquad (۲)$$

برای استفاده از روش ماتریس انتقال در حل این مسئله، جمله تغییر فاز برای j امین لایه در ماتریس انتقال به صورت $\varphi_j = k_j \times d_j$ نوشته می‌شود. در این رابطه:

$$k_j = k\left\{1+\frac{P_P}{2n^2}\left[\chi'_R(\omega) - \frac{i\chi''_R(\omega)}{1+\frac{\left(P_P^2\times(\bar{P}_{S_i}^B+\bar{P}_{S_i}^F)^2\right)}{P_{sat}^4}}\right]\right\} \qquad (۳)$$

که $\mathbf{P_p}$، $\mathbf{p_S^F}$ و $\mathbf{P_S^B}$ به ترتیب توان پمپ تابشی و توان استوکس رفت و برگشت در هر لایه هستند. همچنین χ' و χ'' به ترتیب ضریب شکست و تغییرات باند تقویت رامان بر حسب فرکانس را نشان می‌دهند (شکل (۲-۲)) [۳]. به عبارتی عدد موج هر لایه در این سیستم به دو قسمت حقیقی و موهومی تقسیم می‌شود. قسمت حقیقی عدد موج، تغییر فاز ایجاد شده در سیستم را نشان می‌دهد که وابسته به فرکانس و متناسب با توان پمپ سیستم است.



شکل ۲-۲: تغییرات ضریب شکست محیط رامان و پهنای تقویت رامان بر حسب فرکانس

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

قسمت موهومی عدد موج، وجود تقویت (بهره) در سیستم را نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی مقدار ضریب شکست مرکزی ۲ در نظر گرفته شده و تغییرات ضریب شکست در سیستم از مرتبه ۰/۰۰۲± است. همچنین بهره رامان دارای فرم شکل (۲-۲) با پهنای باند تقویت یک نانومتر و فرکانس مرکزی ۵۴۳ نانومتر است.

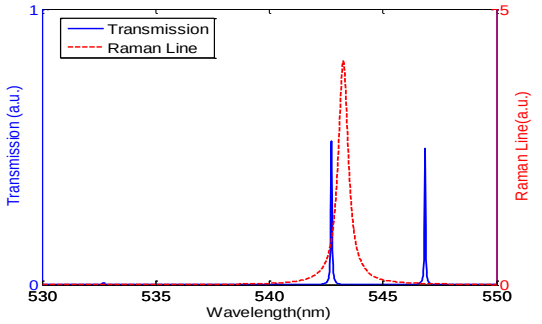
همچنین تابش پمپ به صورت عمود بر جهت حرکت میدان‌ها درون سیستم، در نظر گرفته می‌شود که به دلیل عرضی بودن تابش پمپ، میدان ورودی به سیستم از دو طرف صفر می‌شود. زیر حد آستانه، میدان خروجی از سیستم هم صفر است. پس از افزایش توان پمپ تا حد آستانه، میدان خروجی سیستم غیر صفر می‌شود و لیزر تصادفی، شروع به نوسان می‌کند. با فرض ثابت بودن توان پمپ درون سیستم و در نظر گرفتن استوکس تا مرتبه اول، فقط باید معادلات کوپل شده، رفت و برگشت را برای استوکس مرتبه اول حل نمود. که مخرج کسر $\chi''_{\mathrm{Raman}}(\omega)$ در رابطه (۳) از حل این معادلات بدست می‌آید. همچنین ضریب عبور و انعکاس کل سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R = \frac{M_{12}}{M_{22}} \qquad (۶)$$

$$T = -\frac{\det(M)}{M_{22}} \qquad (۷)$$

۲-۲- نتایج شبیه سازی برای لیزر تصادفی رامان

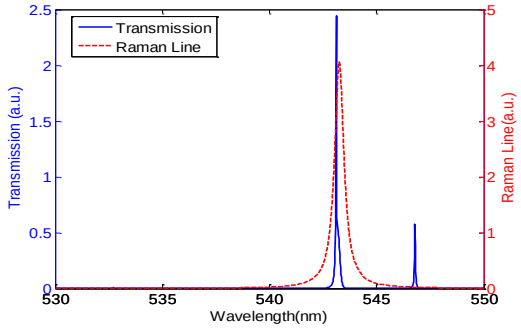
در نمودار (۲-۳) میزان عبور در یک سیستم تصادفی شامل ۴۰ لایه در پمپ صفر $(P_p = 0)$ رسم شده است.



شکل ۲-۳: ضریب عبور و پهنای باند رامان بر حسب طول موج به ازای پمپ صفر

در این حالت از یک پرتو اندازه‌گر (E_1) با توان پایین در ورودی سیستم استفاده می‌شود. به وسیله این پرتو می‌توان شبه مدهای سیستم را بدست آورد. در نمودار (۲-۳) دو شبه مد در طول موج ۵۴۲/۵ و ۵۴۷ نانومتر مشاهده می‌شوند. اما به دلیل کم بودن پهنای تقویت رامان تنها شبه مد با فرکانس ۵۴۲/۵ نانومتر در پهنای تقویت رامان قرار گرفته است و با بالا بردن توان پمپ تا حد آستانه می‌تواند تبدیل به مد لیزر تصادفی شود.

سپس توان پمپ سیستم را تا حد آستانه بالا می‌بریم. در این حالت، میزان عبور سیستم در شبه مد با طول موج ۵۴۲/۵ نانومتر بالا می‌رود (شکل (۲-۴)). این افزایش عبور در سیستم برای این مد به دلیل قرار گرفتن این شبه مد در پهنای تقویت رامان است. همچنین مشاهده می‌شود که طول موج این مد، حدود ۰/۴ نانومتر به سمت فرکانس مرکزی رامان (راست) جابجا می‌شود. این جابجایی فرکانس مد لیزر به دلیل حاصل ضرب مستقیم P_p در تغییرات ضریب شکست (رابطه (۳)) است.

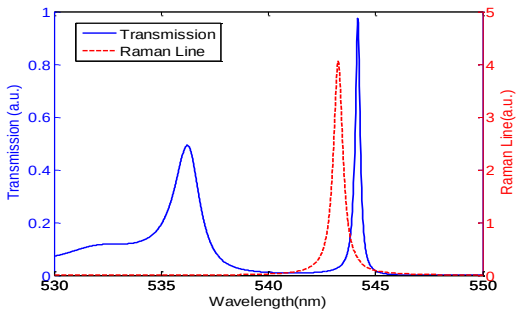


شکل ۲-۴: ضریب عبور و پهنای باند رامان بر حسب طول موج به ازای پمپ بالای حد آستانه

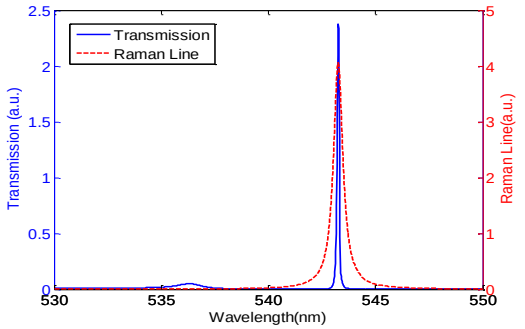
به عبارتی با افزایش توان پمپ، تاثیر تغییرات ضریب شکست (شکل (۲-۲)) بیشتر می‌شود که باعث تغییر در فاز و جابجایی فرکانسی مد لیزر می‌شود. این جابجایی مد لیزر با افزایش توان پمپ ادامه پیدا می‌کند تا فرکانس مد لیزر بر فرکانس مرکزی رامان منطبق شود.

در یک شبیه‌سازی دیگر که در آن ضخامت محیط رامان با مجموعه‌ای دیگر از اعداد تصادفی تعیین می‌شود، شبه مد سیستم در سمت راست فرکانس مرکزی قرار گرفته است (شکل (۲-۵)). در این حالت با افزایش توان پمپ جابجایی فرکانس به سمت چپ اتفاق می‌افتد تا فرکانس لیزر تصادفی بر فرکانس مرکزی بهره رامان منطبق شود (شکل (۲-۶)).

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

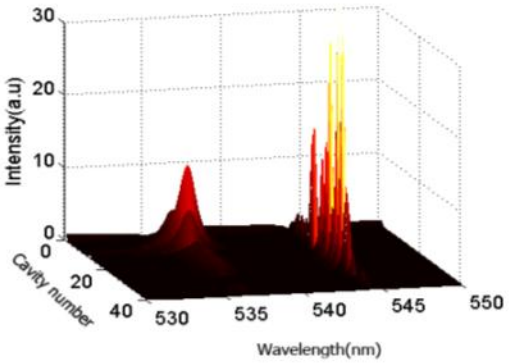


شکل ۲-۵: ضریب عبور و پهنای باند رامان بر حسب طول موج به ازای پمپ بالای حد آستانه



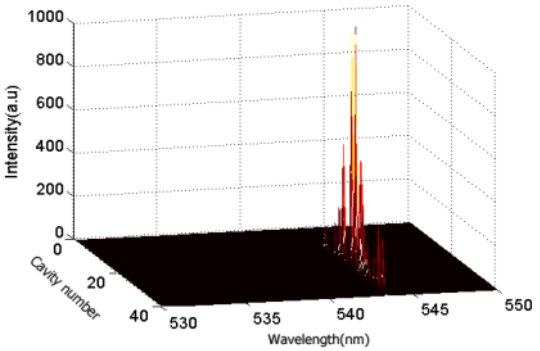
شکل ۲-۶: ضریب عبور و پهنای باند رامان بر حسب طول موج به ازای پمپ بالای حد آستانه

همچنین می‌توان توزیع شدت در این سیستم را محاسبه نمود. در شکل (۲-۷) توزیع تصادفی شدت درون کاواک‌ها برحسب فرکانس و طول موج را برای دومین سیستم تصادفی و با مقدار پمپ تابشی صفر مشاهده می‌کنیم. باتوجه به این نمودار، جایگزیدگی شدت در تعدادی از لایه‌ها (جایگزیدگی اندرسون) باعث ایجاد دو شبه مد در محیط تصادفی می‌شود.



شکل ۲-۷: توزیع شدت در لیزر تصادفی رامان برای توان پمپ صفر

سپس توان پمپ را تا حد آستانه بالا می‌بریم و توزیع شدت درون سیستم محاسبه می‌کنیم. مشاهده می‌شود که توزیع شدت درون سیستم، تنها در یک بازه فرکانسی بسیار کوچک وجود دارد. این بازه فرکانسی مربوط به شبه مد با طول موج ۵۴۴ نانومتر است. افزایش میزان شدت توزیع شده درون سیستم در این حالت نسبت به حالتی که پمپ صفر است (شکل (۲-۷))، قابل ملاحظه است.



شکل ۲-۸: توزیع شدت در لیزر تصادفی رامان برای توان پمپ بالای حد آستانه

همچنین با افزایش توان پمپ تا حد آستانه، پهنای شبه مد کاهش پیدا می‌کند (مقایسه شکل (۲-۷) با (۲-۸) در طول موج ۵۴۴ نانومتر) و تبدیل به مد لیزر تصادفی رامان می‌شود.

۳- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی مدهای لیزر تصادفی رامان با روش ماتریس انتقال پرداختیم. در ابتدا پمپ تابشی به سیستم صفر در نظر گرفته شد و از یک پرتو اندازه‌گر برای محاسبه شبه مدهای سیستم استفاده کردیم. سپس با افزایش توان پمپ تابشی به سیستم، جابجایی مدها به سمت فرکانس مرکزی رامان مشاهده می‌شود. این جابجایی فرکانسی به دلیل تغییرات ضریب شکست محیط رامان در ناحیه تقویت رامان است. با افزایش توان پمپ تابشی جابجایی مدها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که فرکانس مد لیزر بر فرکانس مرکزی رامان منطبق شود.

مراجع

[1] Hokr B. H., Bixler J. N., *Bright emission from a random Raman laser*, **Nature communication** 5 (2014) 4356.
[2] Bahrampour A., Shojaie E., sani M., *Raman random laser in one-dimensional system*, **J. Opt. Soc. Am. B.** 31 (2014) 1308-1315.
[3] A. Yariv, *Quantum Electronics*, 3rd ed. (Wiley, 1967), Chap. 18.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]