



بیست و دومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هشتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۶ تا ۸ بهمن ماه ۱۳۹۴، دانشگاه یزد



بررسی مدهای آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌ی بالا در لیزرهای تصادفی رامان و کوک‌پذیری این مدها با فرکانس پمپ

عباس قاسم‌پور اردکانی، پیمان‌ه رفیعی‌پور

ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده‌ی علوم، بخش فیزیک

چکیده - در این مقاله از روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان برای بررسی عملکرد لیزرهای تصادفی رامان استفاده می‌شود. یک ساختار یک بعدی متشکل از دو لایه‌ی بهره‌ی رامان و دی‌الکتریک به عنوان سیستم لیزر تصادفی رامان در نظر گرفته می‌شود. به صورت عددی نشان می‌دهیم که با افزایش شدت پمپاژ، علاوه بر مد استوکس مرتبه‌ی اول، مدهای آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌های بالا نیز در طیف گسیلی ظاهر می‌شوند. همچنین با استفاده از منحنی شدت خروجی بر حسب شدت ورودی، شدت آستانه برای مدهای مختلف محاسبه می‌شود. علاوه بر این نشان داده می‌شود که با تغییر فرکانس پمپ، کنترل طیف گسیلی و کوک کردن مدهای لیزری استوکس و آنتی- استوکس نیز امکان‌پذیر است.

کلیدواژه- روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان، مدهای آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌ی بالا، لیزرهای تصادفی رامان

Investigation of higher order Stokes and Anti-Stokes modes in Raman random lasers and tunability of these modes with the pump frequency

Abbas Ghasempour Ardakani, Peymaneh Rafieipour

Physics Department, College of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract-In this paper, the finite difference time domain method (FDTD) is employed to investigate the performance of the Raman random lasers. A one-dimensional structure composed of two layers of Raman gain and dielectric medium is considered as the Raman random laser system. We show numerically that by increasing the pump intensity, in addition to the first order Stokes mode, the higher orders of Stokes and Anti-Stokes modes appear in the emission spectra. Moreover, using the curves of output intensity versus pump intensity the threshold values corresponding to different modes are calculated. Furthermore, it is demonstrated that by changing the pump frequency, controlling the emission spectra and tuning of the Stokes and Anti-Stokes modes are possible.

Keywords: FDTD method, higher order Stokes and Anti-Stokes modes, Raman random laser

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

۱- مقدمه

لیزر تصادفی، واژه‌ای است که امروزه بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. این واژه برای توصیف عملکرد لیزرهایی به کار می‌رود که بازخورد آن‌ها نه به وسیله‌ی کاواک‌های لیزری معمولی، بلکه از طریق پراکندگی‌های متعدد نور فراهم می‌شود. این دسته از لیزرها در کنار تفاوت‌هایشان با لیزرهای معمولی، کاربردهای مهم و قابل توجه بسیاری از جمله شناسایی سرطان‌ها، بارکدهای فوتونیک، رمز گذاری، نمایشگرها و تراشه‌های نورتاب، حسگرها و... دارند؛ به گونه‌ای که پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آینده به طور وسیع و همه جانبه مورد استفاده قرار بگیرند. لیزرهای تصادفی اولین بار توسط لتخوف و به صورت تئوری در سال ۱۹۶۸ پیش‌بینی شدند [۱]. در سال ۱۹۹۴ نیز اولین لیزر تصادفی به صورت تجربی ساخته شد [۲].

در کنار لیزرهای تصادفی، لیزرهای تصادفی رامان از توجه ویژه‌ای برخوردار هستند چرا که برخلاف لیزرهای تصادفی معمولی قابلیت کنترل و تنظیم طیف خروجی آن‌ها امکان‌پذیر است. همچنین این لیزرها نیازمند شدت‌های پمپاژ بالایی نیستند، پاسخ‌دهی سریع‌تری دارند و در طی فعالیت خود نیز گرمای زیادی تولید نمی‌کنند. بنابراین امکان تولید نورهای بسیار روشن به وسیله‌ی آن‌ها بدون آسیب رسیدن به محیط لیزری وجود دارد. کاربردهای فراوانی برای آن‌ها پیش‌بینی شده است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به عکس‌برداری پزشکی با وضوح بالا به خصوص در سطح میکروسکوپی اشاره کرد. به صورت تجربی اولین لیزر تصادفی رامان در سال ۲۰۱۳ توسط گروهی به سرپرستی هوکر ساخته شد [۳]. همچنین از نظر تئوری، تاکنون روش‌های ماتریس انتقال غیرخطی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای شبیه‌سازی و بررسی عملکرد لیزرهای تصادفی رامان یک بعدی به کار رفته‌اند [۴ و ۵]. لازم به ذکر است که کاربرد این روش‌ها برای بررسی لیزرهای تصادفی رامان در دو بعد و سه بعد از پیچیدگی‌های بسیاری برخوردار بوده و تقریباً غیرممکن است. همچنین در سایر روش‌های ذکر شده که برای شبیه‌سازی و مدل کردن لیزرهای تصادفی رامان به کار رفته‌اند، از اثراتی مانند برهم‌کنش مدها، رقابت بین آن‌ها، خود اشباعی و اشباع متقابل صرف‌نظر می‌شود. در حالی

که استفاده از روش FDTD، امکان در نظر گرفتن اثرات ذکر شده در لیزرهای تصادفی رامان را ممکن می‌سازد. با استفاده از این روش می‌توان وجود مدهای آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌های بالا را در طیف گسیلی تحقیق کرد و مقدار آستانه را برای هر یک از آن‌ها محاسبه نمود. علاوه بر این‌ها، این روش را می‌توان به بررسی‌های دو بعدی و سه بعدی نیز تعمیم داده و به این ترتیب به اطلاعاتی فراتر دست یافت که درک ما را از عملکرد واقعی این لیزرها افزایش می‌دهد.

۲- روش تئوری

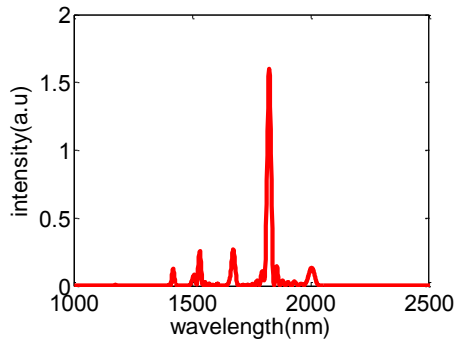
در این مقاله، ساختاری یک بعدی متشکل از دو لایه در نظر گرفته می‌شود. یکی از این لایه‌ها دارای بهره‌ی رامان بوده و تقویت اپتیکی را فراهم می‌کند. در حالی‌که دیگری یک لایه‌ی دی الکتریک و بدون بهره است. ضخامت هر دو لایه متغیر و تصادفی فرض شده‌اند. طرح‌واره‌ی از این ساختار در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، لایه‌های سبز و صورتی به ترتیب با ضخامت‌های d_g و d_h و ضریب شکست‌های n_g و n_h ، معرف محیط بهره‌ی رامان و محیط دی الکتریک هستند. از آن‌جا که سیلیکون و اکسید سیلیکون در تکنولوژی ساخت لایه‌ها و اکسیداسیون بسیار اهمیت دارند، در این مقاله، به ترتیب به عنوان لایه‌های بهره و دی الکتریک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. Si به دلیل بهره‌ی رامان بالایی که دارد، ماده‌ی مناسبی برای کاربرد به عنوان لایه‌ی بهره می‌باشد [۶]. برای برانگیختگی این سیستم فرض شده است که یک میدان موج الکترومغناطیس به عنوان پمپ از سمت چپ بر سیستم می‌تابد:



شکل ۱. طرح‌واره‌ی از یک سیستم تصادفی یک بعدی متشکل از دو لایه‌ی دی الکتریک و بهره‌ی رامان

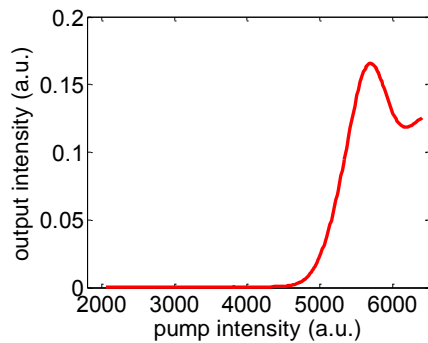
در روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان، معادله‌های ماکسول به قطبش محیط کوپل شده و به صورت همزمان حل می‌شوند. حل آن‌ها در حوزه‌ی زمان صورت می‌گیرد. این معادله‌ها برای یک محیط یک بعدی همسانگرد و غیر مغناطیسه همراه با بهره‌ی رامان، عبارتند از:

۱۸۲۲ و ۲۰۱۳ نانومتر در طیف گسیلی برانگیخته شده‌اند. به علاوه در این شکل دیده می‌شود که مدهای استوکس مرتبه‌های مختلف با یکدیگر انرژی رد و بدل می‌کنند. تفاوت در شدت آن‌ها نشان از انتقال انرژی بین مدها دارد و رقابت بین آن‌ها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال مشاهده می‌شود که مد استوکس مرتبه‌ی دوم از مد استوکس مرتبه‌ی اول شدت بیشتری پیدا کرده است.

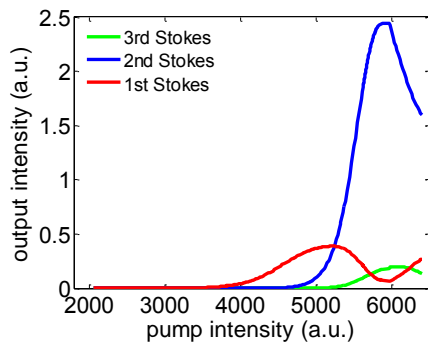


شکل ۳. طیف گسیل بر حسب طول موج به ازای شدت پمپ $I_p=6.4037 \times 10^{-7}$

در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب منحنی شدت خروجی بر حسب شدت ورودی متناظر با مدهای لیزری آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌های بالا نشان داده شده است.



شکل ۴. منحنی شدت خروجی بر حسب شدت ورودی برای مد آنتی استوکس مرتبه‌ی اول.



شکل ۵. منحنی شدت خروجی بر حسب شدت ورودی برای مدهای استوکس مرتبه‌ی اول، دوم و سوم.

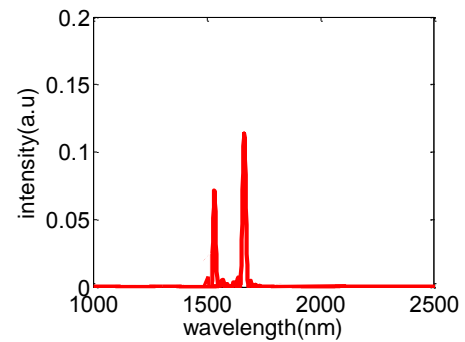
$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial H(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial D(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial P_R(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

که در آن P_R قطبش غیرخطی رامان است و به صورت $P_R = \epsilon_0 \chi_R E$ تعریف می‌شود. پذیرفتاری رامان نام دارد.

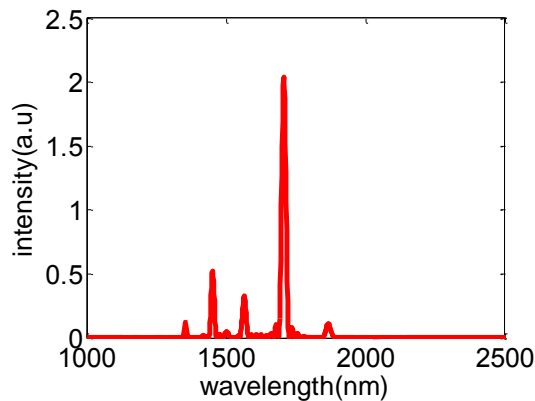
۳- نتایج شبیه‌سازی

ضریب شکست سیلیکون برابر با $3/4$ و اکسید سیلیکون نیز برابر با $1/5$ می‌باشد. طول موج 1532 نانومتر به عنوان طول موج پمپ برای برانگیختگی سیستم به کار رفته است. در شکل ۲ و ۳ طیف گسیل مربوط به لیزر تصادفی رامان به ازای شدت‌های پمپاژ $I_p=4.5448 \times 10^{-7}$ و $I_p=6.4037 \times 10^{-7}$ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، دو قله با طول موج‌های 1532 و 1665 نانومتر وجود دارند. قله‌ی اول مربوط به موج پمپ بوده و قله‌ی دوم مد لیزری استوکس مرتبه‌ی اول است. بنابراین به ازای شدت‌های پمپ پایین، تنها یک مد لیزری در سیستم برانگیخته می‌شود و لیزر تصادفی رامان تک مد است.



شکل ۲. طیف گسیل بر حسب طول موج به ازای شدت پمپ $I_p=4.5448 \times 10^{-7}$

اما با افزایش شدت پمپاژ، بر تعداد مدهای لیزری افزوده شده و مدهای لیزری آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌های بالا نیز در طیف گسیلی ظاهر می‌شوند. به این دلیل که در شدت‌های پمپاژ بالا، بهره‌ی اپتیکی لازم برای برانگیختگی مدهای مرتبه‌ی بالاتر فراهم می‌شود. به عنوان نمونه در شکل ۳، به ترتیب مد لیزری آنتی استوکس مرتبه‌ی اول متناظر با 1419 نانومتر و مدهای لیزری استوکس مرتبه‌ی اول تا سوم متناظر با 1665 ،



شکل ۶. طیف گسیل بر حسب طول موج به ازای شدت پمپ $I_p=6.3751 \times 10^{-7}$ و طول موج پمپ ۱۴۵۰ نانومتر.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله از روش FDTD برای بررسی لیزرهای تصادفی رامان در یک بعد استفاده شد. نتایج نشان دادند که هرچه بر شدت پمپاژ افزوده می‌شود، مدهای آنتی استوکس و استوکس مرتبه‌های بالا نیز در طیف گسیلی ظاهر می‌شوند. همچنین مقدار آستانه برای این مدها محاسبه و برهم‌کنش بین مدها نیز نشان داده شد. در پایان، نشان دادیم که امکان کوک‌پذیری این مدها با تغییر فرکانس پمپ وجود دارد. لازم به ذکر است که در روش FDTD به کار رفته برای لیزرهای تصادفی رامان، اثر رقابت بین مدهای لیزری و پدیده‌های خود اشباع و اشباع متقابل نیز در نظر گرفته می‌شوند. محاسبات ما نشان می‌دهد که این اثرات در این گونه لیزرها قابل صرف نظر کردن نیستند.

مراجع

- [1] Letokhov, V. S., "Generation of light by a scattering medium with negative resonance absorption", *Sov. Phys. JETP* 26 (1968) 835-840.
- [2] Lawandy, N. M., Balachandran, R. M., Gomes, A. S. L., Sauvain, E., "Laser action in strongly scattering media", *Nature* 368 (1994) 436-438.
- [3] Hokr, B. H., Bixler, J. N., Cone, M., Mason, J. D., Beier, H. T., Rockwell, B. A., Thomas, R. J., Noojin, G. D., Petrov, G. L., Golovan, L. A., Yakovlev, V. V., "Bright emission from a random Raman laser", *Nature Communications* 5 (2014) 1-5.
- [4] Bahrapour, A., Shojaie, E., Sani, M., "Raman random laser in one dimensional system", *JOSA B* 31 (2014) 1308-1315.
- [5] B. H. Hokr, J. N. Bixler, V. V. Yakovlev, "higher order processes in random Raman lasing", *Appl. Phys. A* 117 (2014) 681

همان‌طور که مشاهده می‌شود به ازای شدت‌های پمپ پایین، شدت خروجی بسیار کم می‌باشد. اما بعد از یک شدت پمپ مشخص، افزایش شدت خروجی هر مد با شدت پمپ، بسیار سریع‌تر صورت می‌گیرد. این مقدار از شدت پمپ را شدت آستانه می‌نامند. به این معنا که به ازای آن، بهره بر افت غلبه کرده و نوسان در آن مد لیزری آغاز می‌شود. مقدار شدت آستانه از مد آنتی استوکس تا مد استوکس مرتبه‌ی سوم به ترتیب از روی منحنی‌ها برابر با ۴۷۰۰، ۳۸۰۰، ۴۸۰۰ و ۵۳۰۰ به دست آمد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار آستانه برای مد آنتی استوکس مرتبه‌ی اول از مقدار آستانه برای مد استوکس مرتبه‌ی اول بیشتر است. علت مشاهده‌ی این اثر، کم بودن بهره‌ی رامان در مدهای آنتی استوکس نسبت به مدهای استوکس است. همچنین مدهای استوکس مرتبه‌های بالاتر نسبت به مدهای مرتبه‌های پایین‌تر، از آستانه‌ی بیشتری برخوردار هستند. به عنوان مثال آستانه‌ی مد استوکس مرتبه‌ی سوم از آستانه‌ی مد استوکس مرتبه‌ی دوم بیشتر است. دلیل این امر نیز کم بودن بهره‌ی رامان است. افت و خیزهای مشاهده شده در منحنی‌های شکل‌های ۵ و ۴، اثر رقابت بین مدها، تبادل انرژی و اشباع متقابل را نشان می‌دهد. این در حالی است که چنین افت و خیزهایی در منحنی‌های متناظر مربوط به لیزرهای تصادفی معمولی وجود ندارد.

شکل ۶ طیف گسیل متناظر با طول موج ۱۴۵۰ نانومتر را به ازای شدت پمپاژ $I_p=6.3751 \times 10^{-7}$ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با تغییر فرکانس پمپ، مدهای لیزری استوکس و آنتی استوکس نیز تغییر می‌کنند. به عنوان نمونه، مد آنتی استوکس مرتبه‌ی اول ۱۳۴۸ نانومتر و مدهای استوکس مرتبه‌های اول تا سوم ۱۵۶۸، ۱۷۰۷ و ۱۸۷۴ نانومتر در شکل ۶ دیده می‌شوند. بنابراین امکان کوک‌پذیری این لیزرها به وسیله‌ی فرکانس پمپ وجود دارد، به این صورت که با تغییر مناسب فرکانس پمپ می‌توان مدهای لیزری خروجی با طول موج‌های دلخواه مورد نظر را به دست آورد.