

آنالیز لیزر فیبر رامان QWS-DFB با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی SPM و XPM

مریم علیان‌نژادی^{۱*}، فاطمه شهشهانی^۲، وحید احمدی^۳

۱- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان ۲- دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهراء، ۳- استاد، دانشکده برق، گروه الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس (دریافت: ۹۳/۱۲/۰۷، پذیرش: ۹۴/۱۲/۰۹)

چکیده: در این مقاله لیزر فیبر رامان با فیدبک توزیع‌شده و انتقال فاز $\pi/2$ در شرایط بالای آستانه به صورت نظری تحلیل شده است. اثرات خود مدولاسیون فازی و مدولاسیون فاز متقاطع روی عملکرد لیزر در نظر گرفته شده است. نتایج عددی نشان می‌دهد که اثرات غیرخطی خود مدولاسیون فازی و مدولاسیون فاز متقاطع، سبب تقویت توان خروجی لیزر می‌شود. تغییرات طول موج خروجی لیزر با تغییر توان موج دمش نیز در شرایط بالای آستانه ارزیابی شده است. نتیجه محاسبات نشان می‌دهد که در غیاب اثرات غیرخطی، طول موج با تغییر توان موج دمش تغییر نمی‌کند، اما با افزایش توان دمش و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی، انتقال به قرمزی در حدود 0.05 نانومتر در طول موج نوسانی لیزر مشاهده می‌شود. شبیه‌سازی با استفاده از روش ماتریس انتقال و حل سه معادله موج جفت‌شده غیرخطی که انتشار موج دمش، موج استوکس پیشرو و موج استوکس پسرو را در طول فیبر بیان می‌کنند انجام شده است. ماتریس انتقال به کار رفته برای ساختار لیزر فیبر رامان با فیدبک توزیع‌شده برای اولین بار در این مقاله معرفی شده است.

واژگان کلیدی: لیزر با فیدبک توزیع‌شده، لیزر فیبر رامان، خود مدولاسیون فازی، مدولاسیون فاز متقاطع.

۱- مقدمه

عملکرد لیزر فیبر R-DFB در شرایط بالای آستانه با در نظر گرفتن دو اثر غیرخطی مدولاسیون فاز متقاطع^۲ (XPM) و خود مدولاسیون فازی^۳ (SPM) به صورت تئوری بررسی شده است. آنالیز لیزر به کمک حل معادلات موج جفت‌شده غیرخطی و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی SPM و XPM و به کمک روش ماتریس انتقال انجام شده است. بر اساس اطلاعات نویسندگان مقاله، ماتریس انتقال استفاده‌شده برای شبیه‌سازی، اولین بار در این مقاله معرفی شده است. در بخش ۲ تئوری عملکرد لیزر بیان شده و بخش ۳ به نتایج حاصل از شبیه‌سازی اختصاص دارد. در بخش ۴ نتیجه‌گیری کوتاهی ارائه خواهد شد.

۲- تئوری و مبانی فیزیکی

ساختار مورد مطالعه در این مقاله یک لیزر فیبر نوری رامان DFB است که در وسط طول توری آن یک اختلاف فاز معادل $\pi/2$ ایجاد شده و به اختصار آن را QWS^۴ می‌نامیم. در شکل (۱) طرح ساده‌ای از این ساختار مشاهده می‌شود. توان موج ورودی دمش، P_0 ، با طول موج λ_p روی شکل نشان داده شده است.

لیزرهای کوک‌پذیر در ناحیه مادون قرمز به‌طور گسترده در بیناب‌نمایی، حسگرها، مخابرات نوری و لیدارها کاربرد دارند. لیزرهای فیبر نوری با آلاییدگی اربیم، ایتربیم، پرازئودیمیم [۱] از جمله لیزرهایی هستند که در موارد فوق کاربرد دارند، ولی معمولاً پهنای خط این لیزرها زیاد و ناحیه کوک‌پذیری آنها باریک است. لیزرهای فیبر رامان با گستره وسیع کوک‌پذیری، از مادون قرمز تا نوردیدنی، توانستند محدودیت بازه کوک‌پذیری را تا حدود زیادی برطرف نمایند. اخیراً لیزرهای فیبر رامان با توری براگ در هسته فیبر، ساخته و معرفی شده است [۲]. در این لیزرها فیدبک نور به‌طور توزیع‌شده در طول فیبر ایجاد می‌شود. لیزرهای فیبر رامان با فیدبک توزیع‌شده^۱ R-DFB علاوه بر بازه کوک‌پذیری وسیع و نویز کم دارای پهنای خط بسیار باریک بوده و پهنای خط کمتر از 2.5 KHz، برای این نوع لیزر گزارش شده است [۳]. با توجه به نوظهور بودن لیزرهای R-DFB، اغلب تحلیل تئوری عملکرد لیزر در شرایط آستانه صورت گرفته است [۴-۶]. در مقاله حاضر

* ایمیل نویسنده پاسخگو: m_alianezhadi@semnan.ac.ir

1. Raman Distributed Feedback

2. Cross phase modulation
3. Self-phase modulation
4. Quarter Wavelength Shift

در روش ماتریس انتقال، طول کاواک به N قسمت مساوی تقسیم می‌شود و در هر قسمت هر یک از مشخصه‌های لیزر ثابت فرض می‌شود. در این روش، دامنه‌های موج رفت و برگشت در ابتدای هر قسمت با استفاده از یک ماتریس انتقال به دامنه موج رفت و برگشت در ابتدای قسمت بعدی مربوط می‌شود که دستیابی به این عناصر مورد نظر است.

برای سهولت در حل معادلات موج کوپل شده (۱-الف) تا (۱-پ)، پارامترهای زیر تعریف شده است:

$$\alpha = \frac{g_s}{2} |A_p|^2 - \frac{\alpha_{IS}}{2} \quad (۲-الف)$$

$$\delta_f = \delta\beta + \gamma_s (2|A_p|^2 + |A_f|^2 + 2|A_b|^2) \quad (۲-ب)$$

$$\delta_b = \delta\beta + \gamma_s (2|A_p|^2 + 2|A_f|^2 + |A_b|^2) \quad (۲-ج)$$

جواب آزمایشی‌ای به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$A_f(z) = A_1 e^{iqz} + B_1 e^{-iqz} \quad (۳-الف)$$

$$A_b(z) = A_2 e^{iqz} + B_2 e^{-iqz} \quad (۳-ب)$$

در روابط فوق A_1, A_2, B_1, B_2 ضرایب ثابت و q ثابت انتشار مختلط است که با شرایط مرزی موجود در هر قسمت تعیین می‌شوند. جواب‌های آزمایشی (۳-الف) و (۳-ب) را در معادله (۱-الف) و (۱-ب) قرار داده و پس از یک سری محاسبات ریاضی، q برابر است با:

$$q = \frac{-(\delta_b - \delta_f) \mp \sqrt{(\delta_b - \delta_f)^2 - 4[(\alpha + i\delta_f)(\alpha + i\delta_b) + \kappa^2]}}{2} \quad (۴)$$

انعکاس جزئی در هر بخش به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_A = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\kappa}{q + i(\alpha + i\delta_f)} \quad (۵-الف)$$

$$r_B = \frac{B_1}{B_2} = \frac{q + i(\alpha + i\delta_b)}{\kappa} \quad (۵-ب)$$

با استفاده از روابط (۵-الف) و (۵-ب) در هر قسمت و بازنویسی روابط (۳-الف) و (۳-ب) برای قسمت k ام و $k+1$ ام می‌توان دامنه موج پیشرو A_f و موج پسرو A_b را در بخش $k+1$ ام به صورت زیر مرتبط کرد:

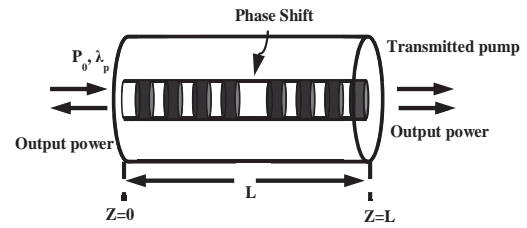
$$A_f(z_{k+1}) = A_f(z_k) \left[\frac{1}{r} e^{iq\Delta z} - \frac{r_B}{r r_A} e^{-iq\Delta z} \right] + A_f(z_k) \left[-\frac{r_B}{r} e^{iq\Delta z} + \frac{r_B}{r} e^{-iq\Delta z} \right] \quad (۶-الف)$$

$$A_b(z_{k+1}) = A_f(z_k) \left[\frac{1}{r r_A} e^{iq\Delta z} + \frac{1}{r r_A} e^{-iq\Delta z} \right] + A_b(z_k) \left[-\frac{r_B}{r r_A} e^{iq\Delta z} + \frac{1}{r} e^{-iq\Delta z} \right] \quad (۶-ب)$$

که در اینجا طول هر قسمت $\Delta z = z_{k+1} - z_k = L/N$ است که L طول فیبر، N تعداد تقسیمات کاواک و $r = 1 + r_B/r_A$ می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} A_f(z_{k+1}) \\ A_b(z_{k+1}) \end{bmatrix} = F(z_{k+1}|z_k) \begin{bmatrix} A_f(z_k) \\ A_b(z_k) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

یک ماتریس 2×2 است که اجزای آن مختلط بوده و



شکل (۱): نمایی از لیزر فیبر نوری رامان QWS-DFB

دامنه کند تغییر موج دمش، A_p ، موج استوکس پیشرو، A_f و موج استوکس پسرو، A_b ، درون لیزر به کمک مجموعه معادلات موج جفت شده مستقل از زمان زیر توصیف می‌شوند [۷].

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = -\frac{g_p}{2} (|A_f|^2 + |A_b|^2) A_p + \frac{2i\pi m_2}{\lambda_p} (|A_p|^2 + 2|A_f|^2 + 2|A_b|^2) A_p - \frac{\alpha_{IP}}{2} A_p \quad (۱-الف)$$

$$\frac{\partial A_f}{\partial z} = \frac{g_s}{2} (|A_p|^2) A_f + i\kappa A_b + i\delta\beta A_f + \frac{2i\pi m_2}{\lambda_s} (2|A_p|^2 + |A_f|^2 + 2|A_b|^2) A_f - \frac{\alpha_{IS}}{2} A_f \quad (۱-ب)$$

$$\frac{\partial A_b}{\partial z} = \frac{g_s}{2} (|A_p|^2) A_b + i\kappa A_f + i\delta\beta A_b + i\frac{2i\pi m_2}{\lambda_s} (2|A_p|^2 + 2|A_f|^2 + |A_b|^2) A_b - \frac{\alpha_{IS}}{2} A_b \quad (۱-پ)$$

که در آن، g_p و g_s به ترتیب ضریب بهره رامان برای موج دمش و موج استوکس است. جمله‌های داخل پرانتز دوم در سمت راست سه معادله (۱-الف) تا (۱-پ) پدیده‌های XPM و SPM را توصیف می‌کنند. کمیت n_2 بخش غیرخطی ضریب شکست، λ_s و λ_p به ترتیب طول موج دمش و استوکس و κ ضریب جفت‌شدگی است که میزان جفت‌شدگی موج استوکس پیشرو و پسرو را بیان می‌کند. $\delta\beta$ انحراف از ثابت انتشار براگ، α_{LS} و α_{LP} به ترتیب ضریب اتلاف خطی فیبر مربوط به طول موج دمش و موج استوکس است. همچنین از نویز تابش خود به خودی تقویت شده (ASE) به دلیل کوچک بودن مقدار آن نسبت به جمله گسیل القایی رامان در شرایط بالای آستانه، صرف نظر شده است.

به منظور تحلیل عملکرد لیزر فیبر رامان QWS-DFB، معادلات موج جفت شده (۱-الف) تا (۱-پ) برای اولین بار با استفاده از روش ماتریس انتقال، TMM، به صورت عددی حل شده است. عناصر این ماتریس با الهام از روش ماتریس انتقال لیزرهای نیمه‌رسانای DFB به دست آمده است. روش ماتریس انتقال روش مناسبی برای حل معادلات موج جفت شده‌ای است که در آن‌ها پارامترها و کمیت‌های فیزیکی در راستای انتشار موج تغییر می‌کنند، می‌باشد.

1. Amplified Spontaneous Emission
2. Transfer matrix method

برابر است با:

$$F_{11} = \frac{1}{r} [e^{iq\Delta z} - \frac{r_B}{r_A} e^{-iq\Delta z}] \quad (۸-الف)$$

$$F_{12} = \frac{r_B}{r} [e^{-iq\Delta z} - e^{iq\Delta z}] \quad (۸-ب)$$

$$F_{21} = \frac{1}{rr_A} [e^{iq\Delta z} - e^{-iq\Delta z}] \quad (۸-ج)$$

$$F_{22} = \frac{1}{r} [e^{-iq\Delta z} - \frac{r_B}{r_A} e^{iq\Delta z}] \quad (۸-د)$$

انتقال فاز $\pi/2$ در مرکز توری با ماتریس زیر در موقعیت قسمت $N/2$ وارد می‌شود:

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \quad (۹)$$

شرایط مرزی در این ساختار عبارت‌اند از:

$$A_f(0) = r_1 A_b(0) \quad (۱۰-الف)$$

$$A_b(L) = r_2 A_f(L) \quad (۱۰-ب)$$

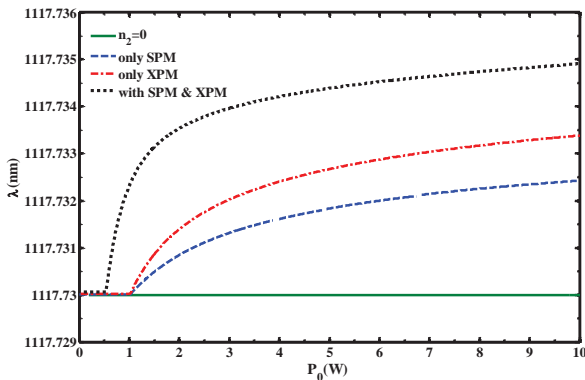
که در آن r_1 و r_2 به ترتیب ضریب بازتاب دو انتهای چپ و راست فیبر می‌باشند. برای آنالیز لیزر در شرایط بالای آستانه و محاسبه توان خروجی و طول موج نوسانی لیزر با شروع از بخش اول، حدس مقادیر اولیه A_b و α و اعمال شرایط مرزی برای دامنه موج استوکس پیشرو، پسرو و موج دممش و اعمال ماتریس انتقال می‌توان دامنه امواج را در انتهای فیبر محاسبه کرد. در صورتیکه شرط مرزی رابطه (۱۰-ب) در انتهای فیبر برقرار باشد، توان موج خروجی از سمت راست و چپ لیزر و نیز طول موج خروجی لیزر محاسبه شده، قابل قبول می‌باشند.

۳- بررسی نتایج عددی

در این مقاله عملکرد یک لیزر فیبر نوری QWS-R-DFB بر پایه مشخصات یک فیبر تجاری UHNA4 با ضریب شکست غیرخطی $\kappa = 37 \text{ m}^{-1}$ ، ضریب جفت‌شدگی $n_2 = 3/2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ، ضریب بهره رامن $g_R = 1/55 \times 10^{-13} \text{ m/W}$ و $\alpha_{LS} = \alpha_{LP} = 0.05 \text{ m}^{-1}$ و طول $L = 30 \text{ cm}$ به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار عددی پارامترهای به‌کاررفته در محاسبه از مرجع [۳] انتخاب شده است. طول موج دممش و استوکس به ترتیب $1064 \mu\text{m}$ و $1111 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است.

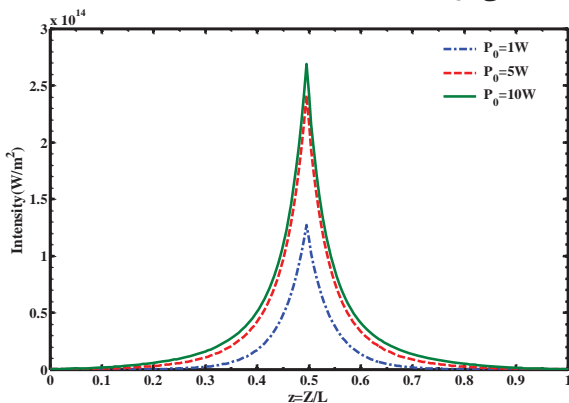
در شکل (۲) تغییرات طول موج نوسانی لیزر برحسب توان دممش در شرایط بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی SPM و XPM ($n_2=0$) و با در نظر گرفتن این دو اثر، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت $n_2=0$ که با خط مستقیم رسم شده، طول موج خروجی لیزر مستقل از توان دممش است. در حالی که با در نظر گرفتن هر یک از اثرات غیرخطی SPM، XPM در طول موج استوکس خروجی انتقال به قرمز

ایجاد و با افزایش توان دممش نیز مقدار آن افزایش می‌یابد. در شرایطی که هر دو اثر SPM و XPM در نظر گرفته شود، بیشترین مقدار تغییر طول موج اتفاق می‌افتد. تغییر طول موج نوسانی استوکس در حضور اثرات غیرخطی SPM و XPM را می‌توان ناشی از وابستگی ضریب شکست فیبر به شدت نور منتشرشده در فیبر دانست.



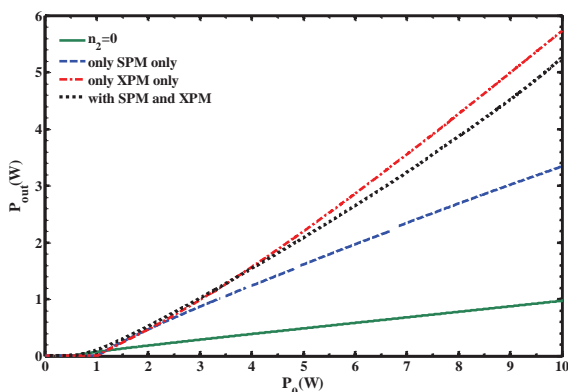
شکل (۲): تغییرات طول موج نوسانی لیزر برحسب توان دممش بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی ($n_2=0$)، و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی XPM و SPM.

به منظور ارائه توضیح بیشتر در این مورد، ابتدا توزیع شدت موج استوکس (مجموع موج پیشرو و پسرو) در طول فیبر با حضور اثرات غیرخطی SPM و XPM بررسی شده است. در شکل (۳) توزیع طولی شدت موج استوکس به ازای سه مقدار متفاوت توان موج دممش رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شدت موج استوکس در وسط طول فیبر افزایش ناگهانی داشته و یک قله در این ناحیه دیده می‌شود و ارتفاع قله نیز با افزایش P_0 افزایش می‌یابد. در واقع به دلیل انتقال فاز $\pi/2$ در وسط طول فیبر در ناحیه توری، تداخل سازنده بین امواج رفت و برگشت ایجاد می‌شود و سبب افزایش ناگهانی شدت و ایجاد قله در آن نقطه می‌شود. این پدیده در لیزرهای با فیدبک توزیع شده مشاهده می‌شود [۸].



شکل (۳): توزیع شدت موج استوکس در طول فیبر با در نظر گرفتن SPM و XPM به ازای سه مقدار توان دممش $P_0 = 1, 5, 10 \text{ W}$. در مرحله بعد تغییرات ضریب شکست مؤثر در طول فیبر در اثر

موج و خروجی لیزر تأثیر می‌گذارد. در ساختار مورد مطالعه در این مقاله با توجه به توان موج دمش، طول فیبر، ضریب جفت-شدگی و دیگر پارامترهای مهم در لیزر، تأثیرات دو اثر غیرخطی SPM و XPM روی توان خروجی لیزر به این شکل ظاهر شده است و پیش‌بینی می‌شود که با تغییر پارامترهای مذکور به شرایط دیگری دست‌یافت.



شکل (۵): تغییرات توان خروجی لیزر فیبر نوری رامان QWS-DFB برحسب توان دمش بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی SPM، XPM و $(n_2=0)$ و با در نظر گرفتن آن.

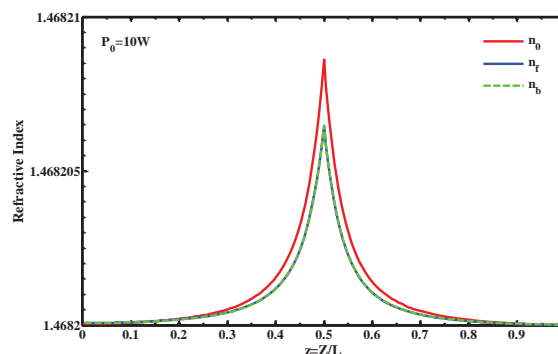
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد لیزر فیبر نوری رامان QWS-R-DFB با در نظر گرفتن اثر SPM و XPM و با استفاده از روش TMM در شرایط بالای آستانه برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است به دلیل این‌که انتقال فاز ایجاد شده در توری و در وسط طول فیبر و شدت موج استوکس در ناحیه وسط فیبر بسیار زیاد است، اثرات غیرخطی SPM و XPM را در عملکرد لیزر نمی‌توان نادیده گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مذکور، طول موج خروجی لیزر به سمت طول موج‌های بزرگتر انتقال می‌یابد. همچنین اثرات غیرخطی SPM و XPM سبب افزایش توان خروجی لیزر می‌شود. به طور مثال به ازای $P_0=5W$ ، توان خروجی لیزر با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی تقریباً ۵ برابر می‌شود.

۵- مراجع

- [1] C. W. Freudiger, W. Yang, G. R. Holtom, N. Peyghambarian, X. S. Xie, and K. Q. Kieu, "Stimulated Raman scattering microscopy with a robust fibre laser source" *Nat. Photonics*, vol. 8, pp. 153-159, 2014.
- [2] P. S. Westbrook, K. S. Abedin, J. W. Nicholson, T. Kremp, and J. Porque, "Raman fiber distributed feedback lasers" *Opt. Lett.*, vol. 36, pp. 2895-2897, 2011.
- [3] J. Shi, Sh. ul-Alam, and M. Ibsen, "Highly efficient Raman distributed feedback fibre lasers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 5, pp. 5082-5091, 2012.

تغییرات طولی شدت موج دمش، استوکس پیشرو و پسرو و به ازای $P_0=10W$ و با حضور اثرات غیرخطی SPM و XPM محاسبه و نتایج در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار تغییرات ضریب شکست مؤثر در طول کاواک با در نظر گرفتن اثرات SPM و XPM به ازای $P_0=10W$ همان‌طور که مشاهده می‌شود در وسط طول فیبر تغییرات ضریب شکست حاصل از شدت نور قابل‌ملاحظه است. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که با در نظر گرفتن اثرات SPM و XPM، موج‌های استوکس پیشرو و پسرو علاوه بر تغییر فاز خطی، با تغییر فاز جدیدی در طول فیبر روبرو شوند. این امر بر روی طول موجی که شرط تداخل سازنده را در توری برآورده می‌کند، تأثیر گذاشته و طول موج خروجی لیزر را تغییر می‌دهد که نتیجه آن را در شکل (۲) مشاهده کردیم.

در شکل ۵ تغییرات توان خروجی لیزر فیبر نوری رامان QWS-DFB برحسب توان دمش بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی SPM و XPM ($n_2=0$) و با در نظر گرفتن این دو اثر، نشان داده شده است. دو اثر غیرخطی SPM و XPM هرکدام به تنهایی سبب افزایش توان خروجی لیزر فیبر رامان QWS-DFB می‌شوند و شیب خط P_{out} برحسب P_0 در اثر XPM نسبت به اثر SPM بیشتر است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی، توان خروجی نسبت به حالتی که اثرات غیرخطی لحاظ نشود، افزایش قابل توجهی می‌یابد. مقدار عددی که برای توان خروجی در این حالت به دست آمده در تطابق با نتایج تجربی گزارش شده در مرجع [۹] است. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار آن است که در حضور هر دو اثر SPM و XPM میزان افزایش P_{out} کمی کوچکتر از زمانی است که فقط اثر XPM در نظر گرفته شود. این پدیده به این دلیل است که دو اثر غیرخطی SPM و XPM بر روی ضریب شکست هسته تأثیر می‌گذارند، این تأثیر در برخی موارد باعث افزایش و در مواردی سبب کاهش شدت خروجی لیزر می‌شود، زیرا فاز موج سیگنال در هر نقطه در طول کاواک تغییر می‌کند بنابراین اختلاف فاز موج رفت و برگشت از این دو اثر غیرخطی متأثر شده و بر روی میزان سازندگی تداخل این دو

- [7] Y. Hu and N. G. R. Broderick, "Improved design of a DFB Raman fibre laser," *Opt. Commun.*, vol. 282, no. 16, pp. 3356–3359, 2009.
- [8] J. Zheng, N. Song, Yu. Zhang, Yu. Shi, S. Tang, Li. Li, R. Guo, and Xi. Chen, "An Equivalent-Asymmetric Coupling Coefficient DFB Laser with High Output Efficiency and Stable Single Longitudinal Mode Operation," *IEEE Photon*, vol. 6, no. 6, 2014.
- [9] J. Shi, Sh-ul. Alam, and M. Ibsen, "Highly efficient Raman distributed feedback fibre lasers," *Opt. Express*, vol. 20, no. 5, pp. 5082–5091, 2012.
- [4] T. Kremp, K. S. Abedin, and P. S. Westbrook, "Closed-form approximations to the threshold quantities of distributed-feedback lasers with varying phase shifts and positions," *IEEE J. Quant. Elect.*, vol. 49, no. 3, pp. 281-292, 2013.
- [5] M. Aliannezhadi, F. Shahshahani, and V. ahmadi, "Analysis of Single Mode Operation and Fiber Length Dependence of Threshold Pump Power of QWS-DFB-RF Laser," *Electrical Engineering*, vol. 44, no. 2, pp 35-42, 2014. (in Persian)
- [6] M. Aliannezhadi and F. Shahshahani, "Analysis of Raman DFB fiber laser with Reflecting Facets at Threshold Condition," 1st Iranian Conference of Electromagnetic Engineering, ICEME, Tehran, 2012. (in Persian)

Analysis of Raman QWS-DFB Fiber Laser Considering Nonlinear SPM and XPM Effects

M. Aliannezhadi*, F. Shahshahani, V. Ahmadi

Department of Physics, Semnan University Semnan

(Received: 26/02/2015, Accepted: 28/02/2016)

Abstract

In this paper, a $\pi/2$ -phase shifted distributed feedback Raman fiber (DFB-RF) laser above threshold condition is analyzed theoretically. The cross phase modulation (XPM) and self phase modulation (SPM) nonlinear effects are considered in the presented model. Numerical results show that the XPM and SPM increase the output power of DFB-Raman fiber laser. Variation of wavelength of structure for different values of pump power has been evaluated in the presence and absence of nonlinear effects. It is found that in the absence of nonlinear effects wavelength of laser is constant. However, in the presence of nonlinear effects a red shift about 5×10^{-2} nm with increasing pump power is observed. Simulation is performed by using transfer matrix method to solve three coupled nonlinear wave equations which describe the propagation of pump, forward and backward Stokes waves. The transfer matrix used for DFB Raman fiber laser, is introduced for the first time in this paper.

Keywords: Distributed Feedback Laser, Raman Fiber Laser, Self-Phase Modulation, Cross Phase Modulation

* Corresponding author E-mail: m_aliannezhadi@semnan.ac.ir