بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

تاثیر ضریب پاشندگی مرتبه چهار بر طیف بهره و رفتار اشباع تقویت کننده‌های پارامتری تار نوری تک پمپ

حسن پاکارزاده، معصومه باقری و سیدمصطفی رضایی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده - در این مقاله، طیف بهره و رفتار اشباع تقویت کننده‌های پارامتری تار نوری با در نظر گرفتن ضریب پاشندگی مرتبه چهار β_4 بررسی می‌گرددد. نتایج شبیه سازی حاصل از حل معادلات جفت شده‌ی دامنه و نیز لحاظ کردن افت تار، نشان می‌دهد که وقتی اختلاف طول موج سیگنال و پمپ زیاد است، لحاظ کردن β_4 در معادلات الزامی است. همچنین با افزایش β_4، بهره افزایش و توان اشباع کاهش می‌یابد. به علاوه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با نزدیک‌تر کردن طول موج پمپ به طول موج با پاشندگی صفر تار نوری پهنای باند بهره وسیع‌تر می‌شود.

کلید واژه- تقویت پارامتری، ناحیه‌ی اشباع، طیف بهره، ضریب پاشندگی مرتبه چهار

Impact of Fourth-Order Dispersion Coefficient on Gain Spectrum and Saturation Behavior of One-Pump Fiber Optical Parametric Amplifiers

Hassan Pakarzadeh, Masoumeh Bagheri and Seyed Mostafa Rezaei

Department of Physics, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

Abstract- In this paper, the gain spectrum and the saturation behavior of fiber optical parametric amplifiers (FOPAs) are investigated by taking into account the fourth-order dispersion coefficient β_4. Simulation results obtained by solving coupled amplitude equations including the fiber loss. show that it is necessary to consider β_4 in the equations when difference between the signal and pump wavelengths is large. Also, with increasing the value of β_4, the gain is increased and the saturation power is decreased. Furthermore, it is shown that when the pump wavelength approaches to the zero-dispersion wavelength of the fiber, the bandwidth of the FOPA becomes much wider.

Keywords: Parametric amplification, gain spectrum, saturation regime, fourth-order dispersion coefficient

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

اساس کار تقویت کننده‌های پارامتری تار نوری (FOPA[1]) پدیده‌ی ترکیب چهارموج (FWM[2]) است که بر پایه‌ی فاز نسبی بین چهار فوتون عمل می‌کند و در نتیجه انتقال انرژی از پمپ به یک سیگنال ضعیف صورت می‌گیرد. در FOPA موج سیگنال به همراه موج پمپ به درون تار هدایت شده و در خروجی تار موج سیگنال تقویت شده به همراه پمپ و یک مولفه‌ی جدید فرکانسی یعنی آیدلر[3] پدیدار می‌شود. اگر پمپ به اندازه‌ی کافی قوی باشد و شرط تطابق فاز برآورده شود، بهره‌ی قابل توجهی به دست می‌آید. یکی از ویژگی‌های FOPA که آن را از دیگر تقویت کننده‌ها مانند EDFA[4] متمایز می‌کند، امکان داشتن طول موج مرکزی دلخواه است. بطوریکه ناحیه‌ی بهره می‌تواند در هر طول موج دلخواهی که تار دارای طول موج با پاشندگی صفر (ZDW[5]) نزدیک به آن طول موج باشد، متمرکز شود. از این ویژگی می‌توان برای بهبود بهره درنواحی که تقویت کننده‌های تجاری وجود ندارند، بهره جست.

FOPA ها به دلیل داشتن بهره‌ی بالا و نسبتا هموار در یک پهنای باند وسیع، حائز اهمیت هستند[۱]. در دهه‌ی اخیر FOPA در ناحیه‌ی اشباع به علت کاربردهایی نظیر حذف نویز، بازسازی و تولید پالس‌های کوتاه مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲-۵]. ازجمله عوامل موثردر پهنای باند و بهره‌ی FOPA پاشندگی تار و افت آن می‌باشد. در اغلب شبیه سازی‌ها تنها تا مرتبه‌ی سوم پاشندگی β_3 لحاظ می‌شود و تنها در مقالات معدودی مراتب بالای پاشندگی تا مرتبه چهار β_4 برای ناحیه‌ی سیگنال کوچک و بدون در نظر گرفتن اتلاف تار بررسی شده است [۶و۷]. با توجه به اهمیت کاربرد FOPA در ناحیه‌ی اشباع، لحاظ کردن اتلاف تار و مراتب بالای پاشندگی موجب دستیابی به بهره‌ی اشباع دقیق‌تر و نزدیکتر به نتایج تجربی می‌گردد. در این مقاله برای اولین بار به بررسی اثر پاشندگی مرتبه چهار (β_4) بر توان اشباع و بهره‌ی تقویت کننده‌های پارامتری تک پمپ در ناحیه‌ی اشباع، با در نظر گرفتن اتلاف تار می‌پردازیم.

۲- مبانی نظری

در یک تقویت کننده‌ی پارامتری تار نوری به منظور جورشدگی فاز باید پایستگی انرژی و تکانه از طریق معادلات زیر برقرار گردد:

$$2\omega_p = \omega_s + \omega_i \qquad (۱)$$

$$\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - 2\beta(\omega_p) \qquad (۲)$$

که در آن ω_p، ω_s و ω_i به ترتیب بیانگر فرکانس زاویه‌ای پمپ، سیگنال و آیدلر است. $\Delta\beta$ عدم جورشدگی خطی بردار موج نامیده می‌شود و β ثابت انتشار است که می‌توان آن را به کمک بسط تیلور حول فرکانس پاشندگی صفر، ω_0 به صورت زیر نوشت:

$$\beta(\omega) = \beta_0 + (\omega-\omega_0)\beta_1 + \frac{1}{2!}(\omega-\omega_0)^2\beta_2 + \frac{1}{3!}(\omega-\omega_0)^3\beta_3 + \frac{1}{4!}(\omega-\omega_0)^4\beta_4 \qquad (۳)$$

که β_1، β_2، β_3 و β_4 به ترتیب ضرائب پاشندگی مرتبه یک تا چهار هستند. به طور کلی برای شبیه سازی یک FOPA اغلب پاشندگی تا مرتبه‌ی سوم در نظر گرفته می‌شود. اما برای پالس‌های بسیار کوتاه و یا پالس‌های با طیف فرکانسی وسیع، گاهی لازم است که مراتب بالاتر نیز لحاظ گردد. با در نظر گرفتن معادلات (۲) و (۳) می‌توان $\Delta\beta$ را به صورت زیر بیان نمود [۸]:

$$\Delta\beta = -\left\{\beta_3(\omega_p-\omega_0) + \frac{\beta_4}{2}\left[(\omega_p-\omega_0)^2 + \frac{1}{6}(\omega_p-\omega_s)^2\right]\right\} \times(\omega_p-\omega_s)^2 \qquad (۴)$$

معادلات حاکم بر FOPA تک پمپ در ناحیه‌ی اشباع و در حالت کاری موج پیوسته، معادلات جفت شده‌ای هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند[۹]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} = i\gamma\left(|A_p|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_i|^2\right)A_p + 2i\gamma A_s A_i A_p^* \exp(i\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_p \qquad (۵)$$

[1] Fiber Optical Parametric Amplifier
[2] Four-Wave Mixing
[3] Idler
[4] Erbium Doped Fiber Amplifier
[5] Zero-Dispersion Wavelength

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

$$\frac{\partial A_i}{\partial z} = i\gamma\left(|A_i|^2 + 2|A_s|^2 + 2|A_p|^2\right)A_i + i\,\gamma A_s^* A_p^2 \exp(-i\,\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_i \qquad (۶)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial z} = i\gamma\left(|A_s|^2 + 2|A_i|^2 + 2|A_p|^2\right)A_s + i\,\gamma A_i^* A_p^2 \exp(-i\,\Delta\beta z) - \frac{1}{2}\alpha A_s \qquad (۷)$$

در این معادلات، A_p دامنه‌ی پمپ، A_s دامنه‌ی سیگنال، A_i دامنه‌ی آیدلر، α افت تار و γ پارامتر غیرخطی تار می‌باشد. بهره‌ی پارامتری یک FOPA بر حسب dB با رابطه‌ی $G = 10\log\left(\frac{P_{s(L)}}{P_{s(0)}}\right)$ تعریف می‌شود که در آن $P_s(L)$ و $P_s(0)$ به ترتیب توان سیگنال در خروجی و ورودی تار می‌باشند.

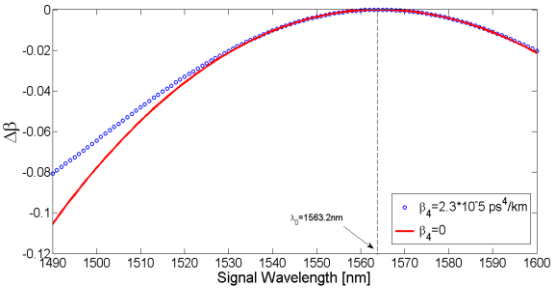
۳- شبیه‌سازی و بحث در نتایج

با در نظر گرفتن معادله‌ی (۴) و حل عددی معادلات جفت شده‌ی (۵) تا (۷) می‌توان بهره‌ی پارامتری در ناحیه‌ی اشباع را شبیه‌سازی کرد. لازم به ذکر است که پارامترهای تار مورد نیاز، از مرجع[۱۰] اقتباس شده است:

$\lambda_0 = 1563/2nm$ ، $\gamma = 13/5W^{-1}km^{-1}$

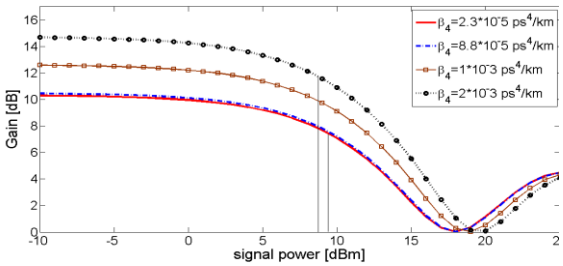
$\alpha = 0.5^{dB}/_{km}$ ، $\lambda_s = 1550.0$ $\lambda_p = 1564.2$

و طول تار $L = 160m$ است. همچنین ضرائب پاشندگی در محل طول موج با پاشندگی صفر λ_0 بصورت $\beta_3 = 0.038 ps^3/km$ و $\beta_4 = 2.3\times10^{-5}\ ps^4/km$ است.



شکل۱: عدم جورشدگی خطی بردارموج FOPA بر حسب طول موج سیگنال ورودی با در نظر گرفتن β_4 (منحنی با نماد دایره) و بدون β_4 (منحنی باخط پر).

شکل (۱) منحنی عدم جورشدگی خطی بردارموج FOPA برحسب طول موج سیگنال λ_s با در نظر گرفتن پاشندگی مرتبه‌ی ۴ برای $\lambda_p = 1564.2nm$ را نشان می‌دهد. در نواحی مرکزی اطراف λ_0 ($1540nm < \lambda_s < 1580nm$) حضور β_4 هیچ تاثیری در میزان $\Delta\beta$ ندارد و هر دو منحنی بر هم منطبق می‌شوند. این بدین دلیل است که بنا به رابطه (۴) وقتی طول موج پمپ و سیگنال زیاد از هم دور نباشند، $\omega_p - \omega_s$ مقداری کوچک است. از طرفی به‌دلیل کوچک بودن β_4 در مقایسه با β_3 جمله‌ی مربوط به β_4 در رابطه‌ی مربوطه بسیار کوچک می‌شود. اما با دور شدن از نواحی مرکزی، اختلاف دو منحنی بیشتر و تاثیر β_4 افزایش می‌یابد. یعنی به طور کلی می‌توان گفت که وقتی اختلاف طول موج سیگنال و پمپ حدود ۴۰nm است، نیازی به در نظر گرفتن مراتب بالای پاشندگی نمی‌باشد. همان‌طور که از شکل (۱) پیداست در طول موج با پاشندگی صفر (ZDW=1563.2nm) میزان پاشندگی بنا به تعریف صفراست.

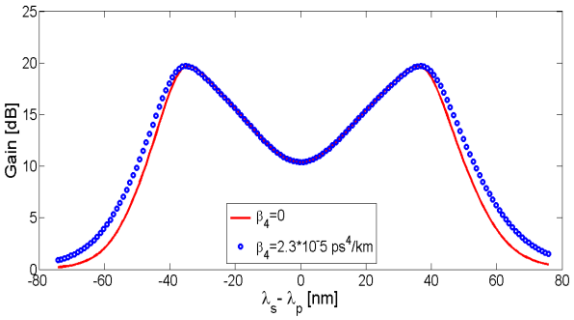


شکل۲: منحنی اشباع FOPA برای مقادیر مختلف β_4 و مقدار ثابت $\beta_3 = 0.038 ps^3/km$.

شکل ۲ منحنی اشباع FOPA را نشان می‌دهد که در آن بهره برحسب توان سیگنال ورودی برای مقادیر مختلف β_4 و مقدار ثابت $\beta_3 = 0.038 ps^3/km$ رسم شده است. همانطور که دیده می‌شود، برای یک توان پمپ ثابت $P_p = 3W$، با افزایش توان سیگنال ورودی، بهره‌ی پارامتری تدریجا کاهش می یابد بطوریکه طبق تعریف در یک توان سیگنال خاص، P_{sat}، که توان اشباع نامیده می‌شود، بهره به اندازه‌ی 3dB کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر توان سیگنال ورودی بهره به سیر نزولی خود ادامه می‌دهد. شکل۲ بیانگر تاثیر ضریب پاشندگی مرتبه چهار بر رفتار اشباع و توان اشباع FOPA می‌باشد. هرچه β_4 بزرگتر باشد، میزان بهره بیشتر و توان اشباع کمتر است

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

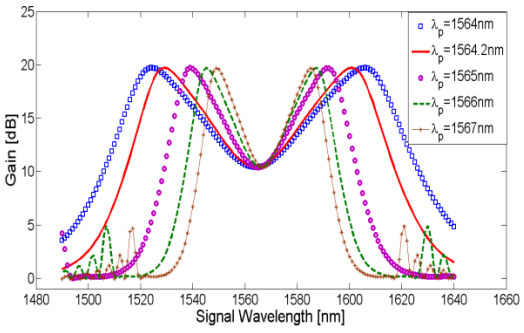
که این امر از طریق خطوط عمودی داخل شکل مشهود است.



شکل۳: تاثیر ضریب پاشندگی مرتبه چهار بر طیف بهره‌ی FOPA در ناحیه‌ی اشباع برای توان سیگنال ورودی $P_S = 12dBm$.

نمودار بهره‌ی اشباع برای FOPA تک پمپ با مشخصات ذکر شده برای $P_p = 3W$ در شکل (۳) آورده شده است. با توجه به شکل (۲) و رفتار اشباع تقویت کننده، توان سیگنال $P_s = 12dBm$ در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۳) می‌بینیم و بنا به توضیحات شکل (۱) در نقاط میانی نمودار حضور β_4 تاثیری در میزان بهره‌ی اشباع ندارد. اما در خارج از نواحی مرکزی و در دنباله‌های طیف، افزایش β_4 بهره‌ی اشباع را بیشتر می‌کند.

شکل (۴) طیف بهره‌ی FOPA در ناحیه‌ی اشباع با در نظر گرفتن ضریب پاشندگی مرتبه‌ی ۴ به ازای طول موج‌های مختلف پمپ با $\lambda_0 = 1563.2nm$ را نشان می‌دهد. برای داشتن پهنای باند وسیع در FOPA باید طول موج پمپ به طول موج با پاشندگی صفر نزدیک باشد. در شکل (۴) به خوبی مشهود است که با افزایش λ_p و دور شدن آن از λ_0 پهنای باند کم می‌شود، اگرچه میزان بهره‌ی بیشینه در همه نمودارها تقریبا یکسان است.



شکل ۴: طیف بهره ی FOPA در ناحیه‌ی اشباع با در نظر گرفتن پاشندگی مرتبه‌ی ۴ به ازای طول موج‌های مختلف پمپ با $\lambda_0 = 1563.2nm$.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طیف بهره و رفتار اشباع تقویت کننده‌های پارامتری تار نوری با در نظر گرفتن ضریب پاشندگی مرتبه‌ی چهار β_4 بررسی شد. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که با افزایش β_4 علاوه بر افزایش بهره می‌توان به توان اشباع پایین‌تری دست یافت که برای کاربرد FOPA در پردازش سیگنال وحذف نویز اهمیت دارد. به علاوه وقتی که اختلاف طول موج سیگنال و پمپ زیاد است (بیش از ۴۰nm) لحاظ کردن β_4 در معادله‌ی پاشندگی الزامی است. هر چقدر طول موج پمپ به طول موج با پاشندگی صفر نزدیکتر باشد، به پهنای باند وسیعتری می‌توان دست یافت.

مراجع

[1] M. E. Marhic, *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices*, Cambridge University Press, 2007.

[2] C. Peucheret, M. Lorenzen, J. Seoane, D. Noordegraaf, C. V. Nielsen, L.G. Nielsen, and K. Rottwitt, *Amplitude regeneration of RZ-DPSK signals in single pump fiber optic parametric amplifiers*, **IEEE Photonics Technology Letters 21**, 2009.

[3] H. Pakarzadeh, A. Zakery, *Modelling of noise suppression in gain-saturated fiber optical parametric amplifiers*, **Optics Communications 309**, 2013.

[4] Z. Lali-Dastjerdi, K. Rottwitt, M. Galili and C. Peucheret, *Asymytric gain-saturated spectrum in fiber optical parametric amplifiers*, **Opt. Express 20**, 2012.

[5] A. Vedadi, A. M. Ariaeri, M. M. Jadidi and J. A. Salehi, *Theoretical study of high repetition rate short pulse generation with fiber optical parametric amplification*, **J. Lightwave Technol., 30**, 2012.

[6] T. Torounidis and P. Andrekson, *Broadband single-pumped fiber-optic parametric amplifier*, **IEEE Photonics Technology Letters 19**, 2007.

[7] C. Floridia, M.L. Sundheimer, L. de S. Menezes, A.S.L. Gomes, *Optimization of spectrally flat and broadband single-pump fiber optic parametric amplifiers*, **Optics Communications 223**, 2003.

[8] M. Karlsson, *Four-wave mixing in fibers with randomly varying zero-dispersion wavelength*, **J. Opt. Soc. Am. B 15**, 1998.

[9] H. Pakarzadeh, A. Zakery, *One-pump fiber optical parametric amplifiers: experiments and simulations*, **Proceeding of 4th Iranian Conference on Photonics Engineering ICPE 2012**, 2012.

[10] J. M. C. Boggio, S. Moro, E. Myslivets, J. R. Windmiller, N. Alic, and S. Radic ,*155-nm continuous-wave two-pump parametric amplification*, **IEEE Photonics Technology Letters 21**, 2009.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]