طراحی تقویت‌کننده فیبر نوری پارامتری باند وسیع با استفاده از فیبر بلور فوتونی غیرخطی

امیر احمدیان[۱]، مهدی خطیر[۲] و غفار درویش[۳]

[۱]دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق - مخابرات، تهران، ایران، [1]amir.ahmadian@ieee.org

[۲]دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق - مخابرات، تهران، ایران، [2]m-khatir@srbiau.ac.ir

[۳]دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی برق - الکترونیک، تهران، ایران، [3]darvish_gh@srbiau.ac.ir

چکیده - در این مقاله ما با بکارگیری ماده‌ی TeO_2، که دارای خاصیت غیرخطی بالاست، در ساختار هشت ضلعی فیبر بلور فوتونی، یک تقویت‌کننده فیبری پارامتریک را طراحی نموده‌ایم. برای این کار به یک لیزر پمپ با طول‌موج و توان مناسب نیاز است که همزمان با سیگنال اطلاعات در فیبر بلور فوتونی منتشر شود. با استفاده از طول کوتاهی از این فیبر، بهره‌ای به میزان dB ۸-۱۲ ، در بازه‌ی وسیع، ۲۰۰ تا ۳۰۰ نانومتر شامل باند C بدست آمد. در ادامه در بررسی اثر تغییر طول موج پمپ، توان پمپ و طول فیبر غیرخطی مشاهده گردید که با افزایش توان پمپ و طول فیبر بهره افزایش می‌یابد. ولی افزایش بیش از اندازه آن‌ها موجب کاهش بهره و ازدست رفتن اطلاعات خواهد شد.

کلید واژه- تقویت‌کننده نوری فیبری پارامتریک، فیبر بلور فوتونی، ترکیب چهار طول‌موج، پاشندگی.

Design Of Wide-Band Fiber Optical Parametric Amplifier Using Nonlinear Photonic Crystal Fiber

Amir Ahmadian[1], Mehdi Khatir*[2], Ghafar Darvish[3]

[1,2,3]Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research Branch,
Islamic Azad University, Tehran, Iran
*Corresponding author's E-mail address: m-khatir@srbiau.ac.ir or Mehdi.khatir@ieee.org (M. Khatir).

Abstract- In this paper we have designed a Fiber Optical Parametric Amplifier (FOPA) based on octagonal lattice TeO_2 highly nonlinear photonic crystal fiber (PCF). The system needs a tunable pump laser with appropriate pump laser power and wavelength co-propagation along the nonlinear fiber with data signal. A typical gain value of 8-12 dB over a wide bandwidth of 200-300 nm – including C band – has been achieved by using a short length of the PCF. In the following, we have investigated the effect of pump wavelength, pump power and fiber length variation on FOPA gain. We have proofed that FOPA gain has increased by fiber length and pump power increment. However, consumedly increment of these two results in gain decrement and data lost.

Keywords: Fiber Optical Parametric Amplification, Nonlinear effect, Photonic Crystal Fiber, Four-wave Mixing, Dispersion

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

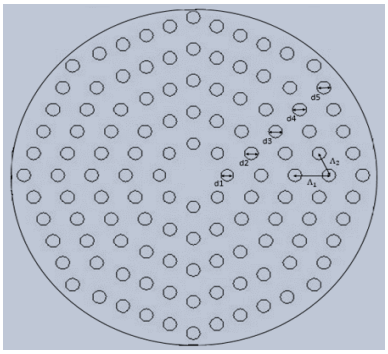
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

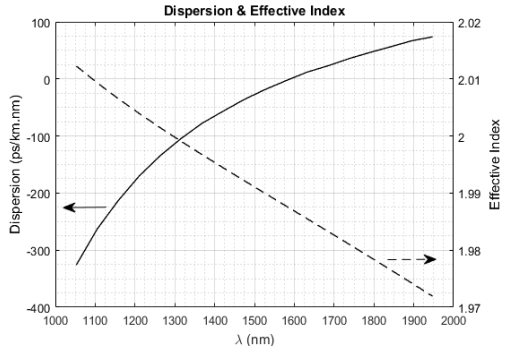
در سال‌های اخیر، تقویت کننده‌های نوری فیبری پارامتریک (FOPA)، بعنوان یکی از کاربردهای اثر غیرخطی تبدیل چهار-طول موج (FWM)، بطور وسیع مورد توجه پژوهشگران حوزه‌ی مخابرات نوری قرار گرفته است [۱-۵]. پهنای باند بالا، قابلیت انتخابی بودن ناحیه‌ی تقویت‌کنندگی، بهره‌ی بالا و سازگاری با سایر ادوات نوری از ویژگی‌های این تقویت کننده ها در مقایسه با تقویت کننده‌های اثر رامان (RA) و تقویت کننده‌های اربیومی (EDFA) هستند [۵،۶]، هرچند تقویت‌کننده‌های دیگر نیز ویژگی‌های خاص خود را دارند [۶]. به منظور فراهم سازی شرایط مناسب برای FOPA، در کنار یک لیزر با طول موج و توان مشخص، نیاز به فیبر با خاصیت غیرخطی بالا و پاشندگی کنترل‌شده نیز داریم. برای تحقق این محیط از فیبرهای بلور فوتونی استفاده می‌کنیم. عملکرد به صورت همواره تک مود [۷]، قابلیت کنترل منحنی پاشندگی با تغییر ابعاد حفره‌های هوایی و فاصه‌ی آن‌ها از یکدیگر [۸] و عملکرد بشدت غیرخطی از ویژگی‌های این نوع فیبرها هستند [۹]. در این مقاله ما ابتدا با استفاده از ماده TeO_2 که ماده ای با ضریب شکست غیر خطی بالا ($n_2 = 6.26\times10^{-19}$) معادل ۲۵ برابر سیلیکا) و بهره‌گیری از ساختار هشت ضلعی، یک فیبر بلورفوتونی را به عنوان محیط تقویت‌کنندگی طراحی و با استفاده از نرم‌افزار Optiwave OptiFDTD شبیه‌سازی می‌کنیم، به‌گونه‌ای که دارای پاشندگی صفر در طول موج مناسب باشد. هرچند تلفات این نوع مواد بسیار بزرگتر از سیلیکا است (۱/۲ dB/m) [۱۰]، لیکن بالا بودن خاصیت غیرخطی ساختار باعث می‌شود بتوان در توان‌های پایین لیزر پمپ و طول‌های کوتاه فیبر غیرخطی، به بهره‌ی مطلوب دست یافت. پس از آن فیبر طراحی شده را در سیستم تقویت‌کننده به کار خواهیم گرفت و تقویت-کنندگی در آن را به صورت تئوریک بررسی می‌کنیم. رویکرد ما استفاده از طول کوتاهی از فیبر در سیستم تقویت کننده است. کارهای زیادی در طراحی تقویت-کنندگی با این روش انجام شده است، اما اکثر آن‌ها در طول‌های زیاد فیبر (چند ده تا چندصد متر) و در توان-های بالا (W ۱۲-۲) ارائه شده‌اند [۱۱،۱۳].

۲- فیبر بلور فوتونی

شکل ۱، ساختار و سطح مقطع فیبر بلورفوتونی طراحی شده را نشان می‌دهد. در این شکل، d_1، d_2، d_3، d_4، d_5، Λ_1 و Λ_2، بترتیب قطر حفره‌های حلقه‌ی اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم و فاصله‌ی بین حلقه‌ها و فاصله‌ی مرکز تا مرکز حفره‌های مجاور در یک حلقه هستند. با انتخاب $d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = ۱\mu m$، $d_1 = ۰/۹\ \mu m$ و همینطور $\Lambda_1 = ۲/۵\ \mu m$ و $\Lambda_2 = ۱/۸۷۵\ \mu m$، نتایج شبیه‌سازی به صورت شکل ۲ (نمودار پاشندگی و ضریب شکست موثر برحسب طول‌موج) بدست آمد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود این فیبر دارای طول موج صفر پاشندگی در $\lambda_0 = ۱۵۹۰nm$ بوده و شیب پاشندگی آن $S = ۰/۲۶۳۵\ ps/km.nm^2$ بدست آمده است. انتشار نور در این فیبر در این بازه طول‌موج به صورت تک مود بوده و سطح مقطع موثر مودی آن در λ_0 برابر $A_{eff} = ۵\ \mu m^2$ بدست آمد.



شکل ۱: ساختار و سطح مقطع فیبر بلور فوتونی



شکل ۲: پاشندگی و ضریب شکست موثر برحسب طول‌موج فیبر بلور فوتونی طراحی شده

۳- تئوری تقویت کننده‌های OPA تک پمپ

چنانچه از طول کوتاهی از فیبر استفاده شود، می‌توان از

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

تلفات آن چشم‌پوشی نمود. در این حالت بهره تقویت-کننده‌ی تک پمپ (کاهیده) غیر حساس به فاز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۳, ۵, ۹]:

$$G_p = 1 + [\frac{\gamma P_p}{g}\sinh(gL)]^2 \qquad (۱)$$

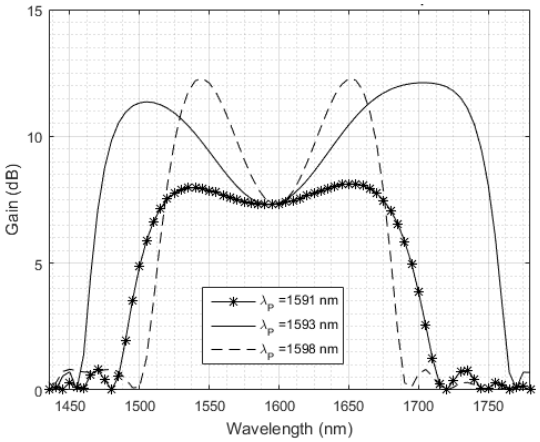
که در آن L طول فیبر و P_p توان پمپ است. $g = \sqrt{(\gamma P_p)^2 - (\kappa/2)^2}$ و $\gamma = 2\pi n_2 / \lambda A_{eff}$ بترتیب ضریب غیر خطی فیبر و بهره پارامتری هستند و $\kappa = \Delta\beta + 2\gamma P_p$ پارامتر عدم تطبیق فاز نام داردکه در آن $\Delta\beta$، عدم تطبیق خطی بردار موج نام داشته و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\beta = \{\beta_3(\omega_p - \omega_0) + \frac{\beta_4}{2}[(\omega_p - \omega_0)^2 + \frac{1}{6}(\omega_p - \omega_s)^2]\}(\omega_p - \omega_s)^2 \qquad (۲)$$

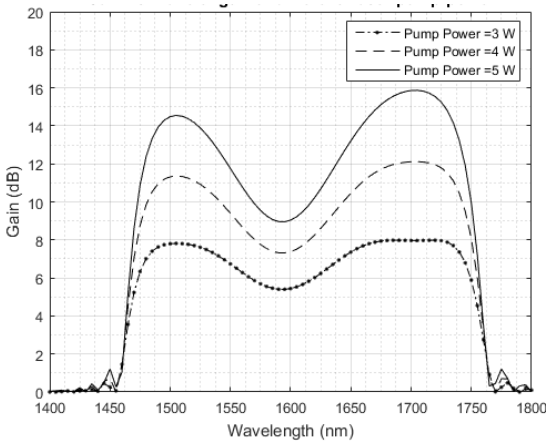
که در این رابطه، $\omega_i = 2\pi c/\lambda_i$ ، $i = p, s, 0$ به ترتیب بسامد زاویه‌ای پمپ، سیگنال و صفر پاشندگی و β_3 و β_4 به ترتیب مشتق مرتبه اول و دوم β_2 در ω_0 هستند. از مجموعه روابط فوق می‌توان دریافت که بهره تقویت‌کننده زمانی بیشینه می‌شود که $\Delta\beta < 0$. در نتیجه با توجه به رابطه‌ی (۲)، باید $\lambda_0 < \lambda_p$ تا شرایط همفازی ایجاد شود.

۴- نتایج

شکل ۳، نمودار بهره تقویت‌کننده بر حسب طول‌موج را به ازای طول فیبر ثابت ۱ m و توان پمپ ثابت ۴ W و طول موج‌های مختلف پمپ، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی طول موج پمپ از طول موج صفر پاشندگی فیبر، بهره و پهنای باند افزایش پیدا می‌کنند، اما پس از آن پهنای باند دوباره کاهش پیدا می‌کند، که مقدار بهینه برای طول‌موج پمپ ۱۵۹۳ nm بدست می‌آید. شکل ۴، نمودار بهره تقویت کننده را بر حسب طول‌موج به ازای طول موج پمپ ۱۵۹۳ nmو طول فیبر ثابت ۱ m و توان‌های مختلف پمپ، نشان می‌دهد. با افزایش توان پمپ، بهره FOPA افزایش پیدا می‌کند. هرچند افزایش بیش از اندازه توان پمپ به باعث بروز اثرات غیرخطی دیگر و تداخل بیت‌ها خواهد شد.



شکل ۳: نمودار بهره تقویت کننده بر حسب طول‌موج به ازای طول فیبر ۱ m و توان پمپ 4 W و طول موج‌های مختلف پمپ

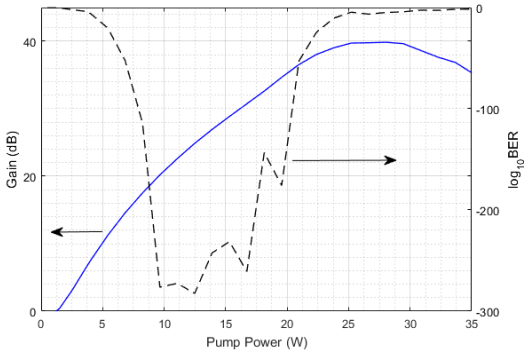


شکل ۴: بهره تقویت کننده بر حسب طول موج به ازای طول فیبر ۱m، طول‌موج پمپ ۱۵۹۳ nmو توان‌های مختلف پمپ

شکل ۵ بهره و نرخ خطای بیت در طول موج $\lambda_0 = 1550nm$ را نشان می‌دهد که با استفاده از شبیه-سازی سیستم تقویت‌کننده با استفاده از نرم‌افزار Optiwave Optisystem بدست آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش توان پمپ، بهره ابتدا افزایش یافته و پس از آن کم می‌شود. نرخ خطای بیت نیز ابتدا کاهش اما قبل از رسیدن بهره به ماکزیمم مقدار خود، رو به افزایش می گذارد. در شکل ۶، نمودار بهره تقویت کننده برحسب طول موج به ازای طول‌موج پمپ ۱۵۹۳ nm و توان ۴ W، و طول‌های مختلف فیبر نشان داده شده است.

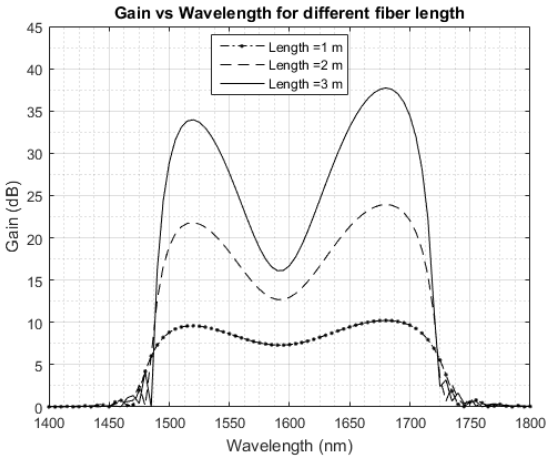
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



شکل ۵: بهره سیگنال بر حسب توان پمپ در طول موج سیگنال nm ۱۵۵۰، طول فیبر m ۱ و طول موج پمپ nm ۱۵۹۵

مشاهده می‌شود که با افزایش طول فیبر، بهره‌ی کل افزایش پیدا نموده و اندکی پهنای باند نیز کاهش می‌یابد. در اینجا نیز مشابه حالت افزایش توان پمپ، افزایش بیش از حد طول فیبر به منظور افزایش بهره باعث ایجاد FWMهای متوالی و آثار غیر خطی دیگر و تداخل سیگنال و نهایتاً از دست رفتن اطلاعات خواهد شد. علاوه بر آن اثر تلفات فیبر نیز رفته رفته آشکار شده که این امر موجب میرایی توان سیگنال خواهد شد.



شکل ۷: بهره برحسب طول موج به ازای توان پمپ W ۴ و طول موج پمپ nm ۱۵۹۳ به ازای طول‌های مختلف

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ما ابتدا یک فیبر بلورفوتونی TeO_2 با مقطع هشت ضلعی غیرخطی را طراحی نمودیم. سپس آن را در یک سیستم تقویت کننده بکار گرفتیم. خاصیت غیرخطی بالای فیبر نشان داد که با استفاده از تنها m ۱ از این فیبر و با توان پمپ W ۴، می‌توان بهره‌ای به میزان dB ۱۲-۸ را در بازه‌ی nm ۳۰۰-۲۰۰ بدست آورد. اثر تغییر طول موج پمپ بر نمودار بهره را بررسی نمودیم. همچنین نشان دادیم که با افزایش توان پمپ و طول فیبر، می‌توان بهره را افزایش داد. هرچند افزایش بیش از حد طول فیبر و توان پمپ موجب از دست رفتن اطلاعات خواهد شد.

۶- مراجع

[1] M. Ferreira, *Nonlinear effects in optical fibers*. John Wiley & Sons, pp. 111-140, 2011.

[2] T. Cheng, K.Asano, Z. Duan, T.H.Tuan, W.Gao, D.Deng, T.Suzuki, and Y.Ohishi, "Design and optimization of tellurite hybrid microstructured optical fiber with high nonlinearity and low flattened chromatic dispersion for optical parametric amplification" *Optics Communications*, Vol. 318, pp. 105-111, 2014.

[3] G. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. Academic press, pp. 397-456, 2013.

[4] T.Torounidis and P.Andrekson, "Broadband single-pumped fiber-optic parametric amplifiers." *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 19, No. 9, pp. 650-652, 2007

[5] M.Marhic, P.Andrekson, P.Petropoulos, S.Radic, Ch.Peucheret and M.Jazayerifar, "Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems". *Laser and photonics reviews*, Vol. 9, No. 1, pp. 50-74, 2015

[6] M. Marhic, *Fiber optical parametric amplifiers, oscillators and related devices*. Cambridge university press, pp. 1-8, 2008.

[7] T.Birks, K.Jonathan, and P.St.J.Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber" *Opt. letters* Vol. 22.13, pp. 961-963, 1997.

[8] S. J. Madden and K. T. Vu, "Very low loss reactively ion etched Tellurium Dioxide planar rib waveguides for linear and non-linear optics." *Optics express, Vol* 17. No: 20, PP: 17645-17651, 2009

[9] F.Poli, A. Cucinotta, S.Selleri, and AH.Bouk, "Tailoring of flattened dispersion in highly nonlinear photonic crystal fibers" *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 16, No 4, pp.1065–1067, 2004.

[10] T. Torounidis, P. Andrekson and B.E. Olsson, "Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain". *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 10, pp. 1194–1196, 2006

[11] M.Ch.Ho, K.Uesaka, M.Marhic, Y. Akasaka and L.G.Kazovsky, "200-nm-bandwidth fiber optical amplifier combining parametric and Raman gain" *Journal of lightwave technology*, Vol. 19, No 7, pp. 977-981, 2001.

[12] F.Poli, A. Cucinotta and S.Selleri, "Photonic crystal fibers: properties and applications", Vol. 102. *Springer Science and Business Media*, 2007.

[13] S.H.Kim, T.Yoko and S.Sakka, "Linear and nonlinear optical properties of TeO2 glass." *J. American Ceramic Society, Vol* 76, No: 10, pp: 2486-2490, 1993

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]