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 تولید ابر پیوستار در تارهای بلور فوتونی برای کاربردهای توموگرافی همدوس نوری در دندانپزشکی

حسن، پاکارزاده [۱] ؛ طاهره، عزت خواه [۲]

[۱]بخش فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

[۲]گروه فیزیک، دانشکده ی علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس

چکیده - در این مقاله، به بررسی تولید ابر پیوستار در تارهای بلور فوتونی درطول موج مرکزی *nm* ۱۳۱۰ برای کاربردهای توموگرافی همدوس نوری *(OCT)* در دندانپزشکی می پردازیم. تولید ابر پیوستار را به کمک حل معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته به روش فوریه‌ی گام مجزا در تار بلور فوتونی غیرخطی شبیه سازی می‌کنیم. در این تحلیل به منظور شبیه سازی هرچه دقیق تر طیف، اثرات پاشندگی تا مرتبه ی چهار، اثررامان و خودسرازیری در نظر گرفته می شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با تنظیم پارامترهای پمپ ورودی از قبیل توان و پهنای پالس، و نیز طول مناسب تار بلور فوتونی به پهن ترین و هموارترین طیف ابرپیوستار به منظوردستیابی به بیشترین وضوح تصاویر در *OCT* برای کاربردهای دندانپزشکی خواهیم رسید.

کلید واژه- تارهای بلور فوتونی، تولید ابرپیوستار، توموگرافی همدوس نوری، دندانپزشکی

Investigation of Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fibers for Optical Coherent Tomography in Dental Applications

Hassan, Pakarzadeh[1]; Tahere, Ezatkhah[2] ;

[1]Physics Department, Shiraz University of Technology, Shiraz

[2]Department of Physics, Faculty of Sciences, Islamic Azad University, Fars Science and Research Branch

Abstract- In this paper, we investigate the supercontinuum generation in photonic crystal fibers in the center wavelength of 1310nm which has applications in dental optical coherence tomography (OCT). Supercontinuum generation in a nonlinear photonic crystal fiber (PCF) is simulated by solving the generalized nonlinear Schrödinger equation (GNLSE) using the split-step Fourier (SSF) method. To increase the accuracy of the simulated spectrum, four-order dispersion coefficient, Raman and self steepening effects are considered. Results show that by properly adjusting the input pump parameters such as the peak power and the pulse width, as well as the PCF length, a very wide and smooth supercontinuum is generated which leads to a high-resolution OCT for dental applications.

Keywords: Photonic Crystal Fibers, Supercontinuum Generation, Optical Coherent Tomography, Dental

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

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

۱- مقدمه

تارهای بلور فوتونی[۱](PCFs) دارای آرایشی منظم و متناوب از حفره های هوا در قسمت غلاف هستند که در اطراف مغزی و موازی با محور تار عموماً در شیشه سیلیکا ایجاد می شوند [۱]. در تارهای بلور فوتونی با مغزی جامد که در واقع مغزی ضریب شکست بیشتری نسبت به غلاف دارد، پرتوهای نور از طریق پدیده‌ی انعکاس کلی تغییریافته درون مغزی هدایت می شوند. یکی از خواص جالب توجه PCF های مغزی جامد این است که پارامتر غیرخطی آن‌ها در مقایسه با تارهای نوری استاندارد، خیلی بزرگتر است، زیرا حبس شدگی بیشتر مد اپتیکی باعث افزایش شدت اثرات غیرخطی در مغزی می گردد. از دیگر مزیت‌های تارهای بلور فوتونی می‌توان به انعطاف پذیری بالای آنها در طراحی نام برد بدین معنی که با تغییر مشخصات هندسی آنها از قبیل سطح مقطع تار، اندازه یا آرایش حفره های هوا، می‌توان تارهائی با خواص نوری شدیداً متفاوت ایجاد کرد[۲].

PCFها یکی از مهم‌ترین محیط‌های غیرخطی برای تولید ابر پیوستار(SCG[۲]) محسوب می‌شوند. ابرپیوستار در واقع پهن شدگی طیفی در محیط پاشنده به علت وجود اثرات غیرخطی است. وسیع ترین طیف هنگامی بدست می‌آید که طول موج پالس پمپ شده نزدیک به طول موج با پاشندگی صفر(ZDW[۳]) محیط غیرخطی باشد[۳]. یکی از مهمترین کاربردهای منابع ابرپیوستار در توموگرافی همدوس نوری(OCT[۴]) است. OCT یک فناوری جدید براساس تداخل سنجی با همدوسی کم در تصویربرداری های مورفولوژیکی است. مزیت اصلی این روش عکس برداری، عمق نفوذ، وضوح بالا و ایجاد تصاویر تشخیصی غیر تهاجمی است[۴].

برای یک منبع با توزیع طیفی گاوسی، وضوح محوری Δz اصولاً توسط طول همدوسی منبع نوری بصورت $l_C = \frac{2\ln 2}{\pi}\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$ بدست می‌آید [۵] که در آن λ طول موج مرکزی منبع و $\Delta\lambda$ پهنای طیفی آن است. برای بهبود وضوح محوری OCT، باید پهنای طیفی افزایش و یا طول موج مرکزی کاهش یابد. براین اساس طیف SCG ناشی از PCF ها می‌تواند به عنوان منبع نور در دستگاه OCT مورد استفاده قرار بگیرند. اصول توموگرافی همدوس نوری و کاربرد آن در دندانپزشکی بطور کامل در مرجع [۵] توضیح داده شده است.

در این مقاله، با حل عددی معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به روش فوریه‌ی گام مجزا، به شبیه سازی SCG در یک PCF با خاصیت غیرخطی بالا می‌پردازیم. از آنجاییکه ناحیه ۱۳۱۰ nm برای کاربردهای OCT در پزشکی مهم است، توجه خود را به این طول موج مرکزی معطوف می‌کنیم. با تنظیم مناسب پارامترهای پالس ورودی (ازقبیل توان و پهنای پالس) و نیز طول تار، پهن-ترین و هموارترین طیف را شبیه‌سازی می‌کنیم تا بیشترین وضوح برای OCT حاصل شود.

۲- مبانی نظری

برای شبیه‌سازی تولید ابرپیوستار به حل معادله‌ی غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به روش فوریه‌ی گام مجزا (SSF[۵]) می‌پردازیم. معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به شکل زیر خواهد بود [۶]:

$$\frac{\partial A(Z,T)}{\partial Z} = -\frac{\alpha}{2}A(Z,T) - \left(\sum_{m=2}\beta_m\frac{i^{m-1}}{m!}\times\frac{\partial^m}{\partial T^m}\right)A(Z,T) + i\gamma\left(1+\frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}\right) \quad (۱)$$
$$\times\left(A(Z,T)\int_{-\infty}^{+\infty}R(t')\left|A(Z,T-t')\right|^2dt'\right)$$

که در آن A پوش پالس ، α افت، β_m ضرایب مختلف پاشندگی و γ پارامتر غیرخطی PCF است. همچنین ω_0 فرکانس مرکزی پالس و R(t) تابع پاسخ رامان را نشان می‌دهد[۳و۷].

معادله (۱) یک معادله‌ی دیفرانسیل جزئی غیرخطی است که به طور کلی به جز در برخی شرایط خاص، حل جبری ندارد، بنابراین اغلب لازم است یک حل عددی برای آن به کار برده شود. روش SSF یک روش فراگیر برای حل

---

[۱] Photonic crystal fiber
[۲] Supercontinuum generation
[۳] Zero-Dispersion Wavelength
[۴] Optical coherence tomography
[۵] Split-step Fourier

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

مسائل انتشار پالس در محیط‌های پاشنده‌ی غیر خطی است. در روش SSF معادله (۱) به شکل زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \qquad (۲)$$

که در آن عملگر پاشندگی به صورت

$$\hat{D} = -(\sum_{m=2} \beta_m \frac{i^{m-1}}{m!} \frac{\partial^m}{\partial T^m} + \frac{\alpha}{2}) \qquad (۳)$$

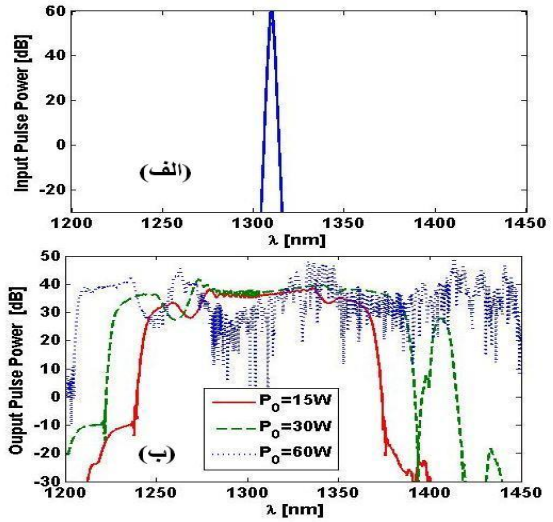
و عملگر غیرخطی به صورت

$$\hat{N}A = i\gamma(1 + \frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T}) \times (A(Z,T)\int_{-\infty}^{+\infty} R(t')|A(Z,T-t')|^2 dt') \qquad (۴)$$

تعریف می‌شود. به طور کلی پاشندگی و اثرات غیرخطی، همزمان در طول تار عمل می‌کنند. حال آنکه در روش SSF فرض براین استوار است که در انتشارِ پالس نوری روی یک گام کوچک h، اثرات غیرخطی و پاشندگی، به صورت مستقل عمل می‌کنند [۶]. دراینجا، طول تار L به N قسمت با گامهای h تقسیم می‌شود که در هر قسمت عملگرهای D و N بطور مجزا تأثیر می‌گذارند.

۳- نتایج و بحث های مربوطه

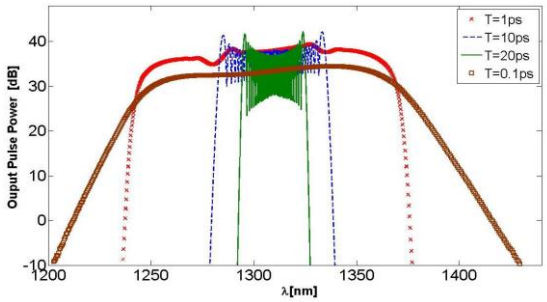
در این بخش، با استفاده از نرم افزار متلب معادله‌ی (۱) را به روش SSF حل می‌کنیم. در اینجا از یک PCF با خاصیت غیرخطی بسیار $\gamma = 0.1106 W^{-1}m^{-1}$ با طول ۱۰۵ متر استفاده می‌کنیم [۸]. این تار که HNL_GePCF نام دارد، قطر مغزی ای برابر با $d_{ge} = 1.12\Lambda$ و فاصله حفره تا حفره ی $\Lambda = 0.73\mu m$ دارد، همچنین قطر حفره های هوا در حلقه اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم به ترتیب برابر است با: $d_1 = 0.29\Lambda, d_2 = 0.78\Lambda, d_3 = 0.83\Lambda, d_4 = d_5 = 0.95\Lambda$ طول موج مرکزی پالس ۱۳۱۰nm با پهنای زمانی ۲/۵ps و توان ۱۵W به درون PCF فرستاده می‌شود. در شکل (۱) تغییرات طیف ابرپیوستار تولید شده برحسب توان-های مختلف پالس ورودی با پهنای ثابت ۲/۵ps نشان داده شده است. شکل ۱ (الف) طیف پالس ورودی و ۱ (ب) طیف پالس خروجی را نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، افزایش توان ورودی منجر به پهن-شدگی بیشتر طیف ابرپیوستار می‌شود بطوریکه برای توان ۶۰W بیشترین پهن‌شدگی حاصل می‌گردد. این بدین دلیل است که با افزایش توان قله‌ی پالس ورودی، اثر مدولاسیون خود فاز (SPM) و در نتیجه تغییر فاز غیرخطی ناشی از آن بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می-یابد، که این خود باعث پهن شدگی طیفی بیشتر **می**شود [۷و۹].



شکل۱: تغییرات طیف ابرپیوستار برحسب توان های مختلف پالس ورودی. با افزایش توان ورودی اثرات غیرخطی از قبیل مدولاسیون خود فاز بیشتر و در نتیجه پهن‌شدگی‌های وسیع‌تری حاصل می‌شود.

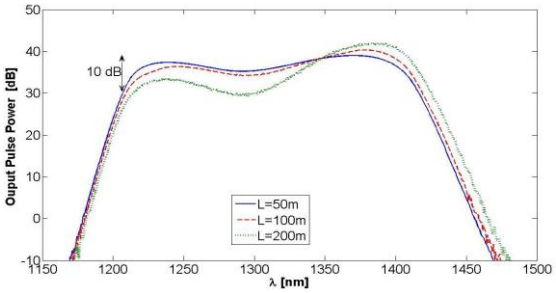
شکل (۲) تأثیر پهنای پالس ورودی (T_0) را بر طیف ابرپیوستار تولید شده به ازای توان ورودی ثابت ۱۵W نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی طول پاشندگی که بصورت $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$ تعریف می شود، افزایش پهنای پالس ورودی باعث کاهش اثرات پاشندگی و نیز کم شدن پهنای طیف پالس ورودی می‌شود. با کاهش پهنای طیف ورودی، اثرات غیرخطی از قبیل پراکندگی رامان درون پالسی و نیز مدولاسیون فاز متقابل کاهش و در نتیجه پهن‌شدگی طیف خروجی کاهش می‌یابد [۶و۹]. در مقابل پالسهای ورودی کوتاهتر، منجر به اثرات غیرخطی قویتر و طیف خروجی پهن تر می‌شوند. بنابراین همانطور که در شکل دیده می‌شود، پالس ورودی با پهنای ps ۰/۱ دارای پهن‌شدگی خروجی بیشتری نسبت به دیگر پالس ها است.

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



شکل ۲: تغییرات طیف ابرپیوستار با پهنای پالس‌های مختلف. با افزایش پهنای پالس اثرات غیرخطی از قبیل پراکندگی رامان درون پالسی کاهش می یابد و پهنای طیفی کم می‌شود.

تأثیر طول PCF بر طیف ابرپیوستار برای پهنای پالس ثابت ۰/۱ps و توان ورودی ۶۰W در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود افزایش طول تار، باعث عدم تقارن طیف بدلیل اثر رامان قویتر می‌شود. درواقع اثر رامان باعث می شود که توان از طول موجهای کوچکتر به سمت طول موجهای بزرگتر شارش یابد.



شکل ۳: تغییرات طیف ابرپیوستار به ازای طول های مختلفی از تار بلور فوتونی برای پهنای پالس ثابت ۰/۱ps و توان ورودی ۶۰W.

بنابرین برای یک PCF باطول ۱۰۰ متر و پالسی با پهنای ۰/۱ps و توان ورودی ۶۰ W به یک ابرپیوستار بسیار پهن در حدود ۲۰۰ nm و بسیار هموار (با توجه به شکل برای ۱۰dB کاهش توان) دست می‌یابیم. این پهنای طیفی، معادل وضوح طولی برابر با ۳۷۸۶ nm است که برای توموگرافی همدوس نوری در کاربردهای دندانپزشکی بسیار مطلوب خواهد بود.

۴- نتیجه گیری

از آنجا که تولید ابر پیوستار، گسترش طیفیِ پالس لیزری منتشر شده در یک محیط پاشنده‌ی غیرخطی است، می‌توان از تارهای بلور فوتونی (PCF) بدلیل ویژگی‌های منحصر بفردشان برای تولید ابرپیوستار استفاده کرد. برای دستیابی به بهترین وضوح تصاویر در توموگرافی همدوس نوری (OCT)، یک منبع ابرپیوستار با طیفی بسیار پهن و هموار لازم است. با توجه به نتایج بدست آمده، چنانچه یک پالس بسیارکوتاه با پهنای ۰/۱ps و توان ورودی ۶۰W در طول موج مرکزی ۱۳۱۰nm به‌درون یک PCF به طول ۱۰۰ m فرستاده شود، یک ابرپیوستار بسیار پهن و هموار (در حدود ۲۰۰ nm) بدست می آید که منجر به وضوح طولی ۳۷۸۶nm برای تصاویرOCT در دندانپزشکی خواهد شد.

مراجع

[1] Russell, Philip (2003) *Photonic Crystal Fibers*. **Science**, Vol. 299, No. 5605, 358-362.

[2] F. Poli, A. Cucinotta, and S. Selleri (2007) *Photonic Crystal Fibers Properties and Applications*. **Springer**

[3] Dudley, J. M., Genty, G., and Cohen, S. (2006) *Supercontinuum generation in photonic crystal fiber*. **Reviews of Modern Physics**, Vol. 78, No. 4, 1135–1184.

[4] Sander, Birgit and Qiang Li, Xiao (2011) Optical Coherence Tomography: A review of current technology and its implications for clinical applications. **SJOVS**, Vol. 4, No. 2 - Review (in English).

[5] Drexler, Wolfgang; Fujimoto, James G. (2008) *Optical Coherence Tomography Technology and Applications*. **Springer**-Verlag Berlin Heidelberg.

[6] Agrawal, Govind p. (2013) *Nonlinear Fiber Optics*. Fifth edition, California: **Elsevier**.

[7] Zheltikov, A.M. (2006) Let there be white light: supercontinuum generation by ultrashort laser pulses. **Physics – Uspekhi**, 49 (6), 605 – 628.

[8] Hossain, M.A., Namihira, Y., Razzak, S.M.A., Islam, M.A., Liu, J., Kaijage, S.F., Hirako, Y. (2012) Design of all normal dispersion highly nonlinear photonic crystal fibers for supercontinuum light sources: Applications to optical coherence tomography systems. **Optics & Laser Technology**, Vol.44, Issue 4, 976–980.

[9] Dudley, J. M., Taylor, J. R. (2010) *Supercontinuum generation in optical fibers*. **Cambridge University Press**.

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