



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<sup>۱</sup>؛ طاهره، عزت خواه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>بخش فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

<sup>۲</sup>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 در طول موج مرکزی  $1310\text{ nm}$  برای کاربردهای توموگرافی همدوس نوری (*OCT*) در دندانپزشکی می پردازیم. تولید ابر پیوستار را به کمک حل معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته به روش فوریه ی گام مجزا در تار بلور فوتونی غیرخطی شبیه سازی می کنیم. در این تحلیل به منظور شبیه سازی هرچه دقیق تر طیف، اثرات پاشندگی تا مرتبه ی چهار، اثر امان و خودسرازیری در نظر گرفته می شود. نتایج بدست آمده نشان می دهد 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 ابر پیوستار به منظور دستیابی به بیشترین وضوح تصاویر در *OCT* برای کاربردهای دندانپزشکی خواهیم رسید.

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

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

Hassan, Pakarzadeh<sup>1</sup>; Tahere, Ezatkah<sup>2</sup> ;

<sup>1</sup>Physics Department, Shiraz University of Technology, Shiraz

<sup>2</sup>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  $1310\text{nm}$  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

## ۱- مقدمه

بهبود وضوح محوری OCT، باید پهنای طیفی افزایش و یا طول موج مرکزی کاهش یابد. براین اساس طیف ناشی از SCG از PCF ها می‌تواند به عنوان منبع نور در دستگاه OCT مورد استفاده قرار بگیرند. اصول توموگرافی همودوس 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 آنجائیکه 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 (از قبیل 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<sup>۰</sup>) می‌پردازیم. معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به شکل زیر خواهد بود [۶]:

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

که در آن A پوش پالس،  $\alpha$  افت،  $\beta_m$  ضرایب مختلف پاشندگی و  $\gamma$  پارامتر غیرخطی PCF است. همچنین  $\omega_0$  فرکانس مرکزی پالس و R(t) تابع پاسخ رامان را نشان می‌دهد [۳ و ۷].

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

تارهای بلور فوتونی (PCFs<sup>۱</sup>) دارای آرایشی منظم و متناوب از حفره‌های هوا در قسمت غلاف هستند که در اطراف مغزی و موازی با محور تار عموماً در شیشه سیلیکا ایجاد می‌شوند [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 تغییر یافته درون مغزی هدایت می‌شوند. 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 می‌گردد. 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 حفره‌های هوا، می‌توان تارهایی با خواص نوری شدیداً متفاوت ایجاد کرد [۲].

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

برای یک منبع با توزیع طیفی گاوسی، وضوح محوری  $\Delta z$  اصولاً توسط طول همودوسی منبع نوری بصورت  $I_C = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$  بدست می‌آید [۵] که در آن  $\lambda$  طول موج مرکزی منبع و  $\Delta \lambda$  پهنای طیفی آن است. برای

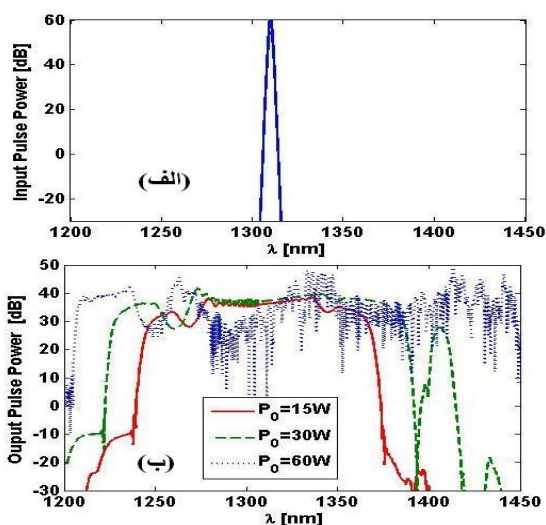
<sup>۱</sup> Photonic crystal fiber

<sup>۲</sup> Supercontinuum generation

<sup>۳</sup> Zero-Dispersion Wavelength

<sup>۴</sup> Optical coherence tomography

شدگی بیشتر طیف ابرپیوستار می‌شود بطوریکه برای توان  $60\text{W}$  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 می‌یابد، که این خود باعث پهن‌شدگی طیفی بیشتر می‌شود [۹ و ۷].



شکل ۱: تغییرات طیف ابرپیوستار برحسب توان‌های 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  $15\text{W}$  نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی طول پاشندگی که بصورت  $L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}$  تعریف می‌شود، 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 [۹ و ۶]. در مقابل پالسه‌های ورودی کوتاه‌تر، منجر به اثرات غیرخطی قوی‌تر و طیف خروجی پهن‌تر می‌شوند. بنابراین همانطور که در شکل دیده می‌شود، پالس ورودی با پهنای  $0.1\text{ ps}$  دارای پهن‌شدگی خروجی بیشتری نسبت به دیگر پالس‌ها است.

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

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A \quad (2)$$

که در آن عملگر پاشندگی به صورت

$$\hat{D} = -\left(\sum_{m=2}^{\infty} \beta_m \frac{i^{m-1}}{m!} \frac{\partial^m}{\partial T^m} + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

و عملگر غیرخطی به صورت

$$\hat{N}A = i\gamma\left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T}\right) \quad (4)$$

$\times (A(Z, T) \int_{-\infty}^{+\infty} R(t') |A(Z, T - t')|^2 dt')$  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 انتشار پالس نوری روی یک گام کوچک  $h$ ، اثرات غیرخطی و پاشندگی، به صورت مستقل عمل می‌کنند [۶]. در اینجا، طول تار  $L$  به  $N$  قسمت با گام‌های  $h$  تقسیم می‌شود که در هر قسمت عملگرهای  $D$  و  $N$  بطور مجزا تأثیر می‌گذارند.

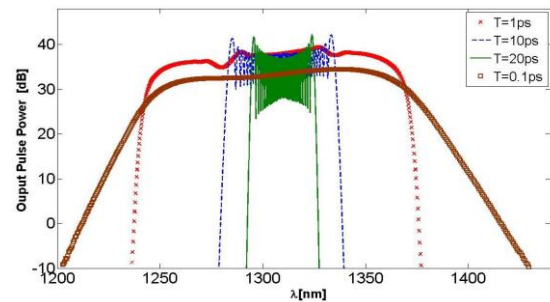
### ۳- نتایج و بحث‌های مربوطه

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  $\gamma = 0.1106\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$  با طول  $10.5$  متر استفاده می‌کنیم [۸]. این تار که HNL\_GePCF نام دارد، قطر مغزی‌ای برابر با  $d_{ge} = 1.12\lambda$  و فاصله حفره تا حفره  $\Lambda = 0.73\mu\text{m}$  دارد، همچنین قطر حفره‌های 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  $1310\text{ nm}$  با پهنای زمانی  $2/5\text{ ps}$  و توان  $15\text{ W}$  به درون PCF فرستاده می‌شود. در شکل (۱) تغییرات طیف ابرپیوستار تولید شده برحسب توان‌های مختلف پالس ورودی با پهنای ثابت  $2/5\text{ ps}$  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-

نوری (OCT)، یک منبع ابرپیوستار با طیفی بسیار پهن و هموار لازم است. با توجه به نتایج بدست آمده، چنانچه یک پالس بسیار کوتاه با پهنای  $0.1 \text{ ps}$  و توان ورودی  $60 \text{ W}$  در طول موج مرکزی  $1310 \text{ nm}$  به درون یک PCF به طول  $100 \text{ m}$  فرستاده شود، یک ابرپیوستار بسیار پهن و هموار (در حدود  $200 \text{ nm}$ ) بدست می آید که منجر به وضوح طولی  $3786 \text{ nm}$  برای تصاویر OCT در دندانپزشکی خواهد شد.

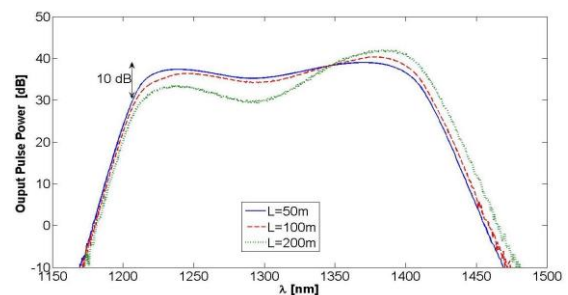
### مراجع

- [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.



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  $0.1 \text{ ps}$  و توان ورودی  $60 \text{ W}$  در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود افزایش طول تار، باعث عدم تقارن طیف بدلیل اثر رامان قویتر می‌شود. در واقع 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  $0.1 \text{ ps}$  و توان ورودی  $60 \text{ W}$ .

بنابراین برای یک PCF با طول  $100 \text{ m}$  و پالسی با پهنای  $0.1 \text{ ps}$  و توان ورودی  $60 \text{ W}$  به یک ابرپیوستار بسیار پهن در حدود  $200 \text{ nm}$  و بسیار هموار (با توجه به شکل برای  $10 \text{ dB}$  کاهش توان) دست می‌یابیم. این پهنای طیفی، معادل وضوح طولی برابر با  $3786 \text{ nm}$  است که برای توموگرافی همدوس نوری در کاربردهای دندانپزشکی بسیار مطلوب خواهد بود.

### ۴- نتیجه گیری

از آنجا که تولید ابر پیوستار، گسترش طیفی 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