



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

^۱بخش فیزیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

^۲گروه 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 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 خودسرازی 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, Pakarzadeh¹; Tahere, Ezatkah² ;

¹Physics Department, Shiraz University of Technology, Shiraz

²Department 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

۱- مقدمه

تارهای بلور فوتونی (PCFs^۱) 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 پدیده ی انعکاس کلی تغییر یافته درون مغزی هدایت می شوند. یکی از خواص جالب توجه PCF های مغزی جامد این است که پارامتر غیرخطی آن ها 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 مزیت های تارهای بلور فوتونی می توان 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، می توان تارهایی با خواص نوری شدیداً متفاوت ایجاد کرد [۲].

PCF ها یکی از مهم ترین محیط های غیرخطی برای تولید ابر پیوستار (SCG^۲) محسوب می شوند. ابر پیوستار در واقع پهن شدگی طیفی در محیط پاشنده به علت وجود اثرات غیرخطی است. وسیع ترین طیف هنگامی بدست می آید که طول موج پالس پمپ شده نزدیک به طول موج با پاشندگی صفر (ZDW^۳) محیط غیرخطی باشد [۳]. یکی از مهمترین کاربردهای منابع ابر پیوستار 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 $I_C = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$ بدست می آید [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 می تواند 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 فوریه ی گام مجزا، به شبیه سازی SCG در یک PCF با خاصیت غیرخطی بالا می پردازیم. از آنجائیکه ناحیه nm ۱۳۱۰ برای کاربردهای OCT در پزشکی مهم است، توجه خود را به این طول موج مرکزی معطوف می کنیم. با تنظیم مناسب پارامترهای پالس ورودی (از قبیل توان و پهنای پالس) و نیز طول تار، پهن ترین و هموارترین طیف را شبیه سازی می کنیم تا بیشترین وضوح برای OCT حاصل شود.

۲- مبانی نظری

برای شبیه سازی تولید ابر پیوستار به حل معادله ی غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به روش فوریه ی گام مجزا (SSF^۵) می پردازیم. معادله غیرخطی شرودینگر تعمیم یافته به شکل زیر خواهد بود [۶]:

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

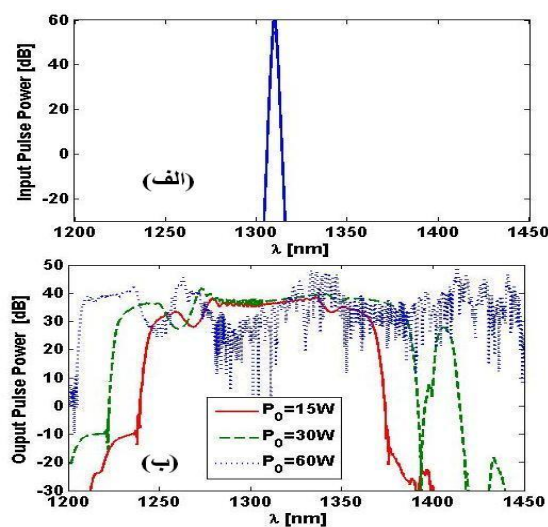
که در آن A پوش پالس، α افت، β_m ضرایب مختلف پاشندگی و γ پارامتر غیرخطی PCF است. همچنین ω_0 فرکانس مرکزی پالس و $R(t)$ تابع پاسخ رامن را نشان می دهد [۳ و ۷].

معادله (۱) یک معادله ی 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

° Split-step Fourier

شدگی بیشتر طیف ابرپیوستار می‌شود بطوریکه برای توان $60W$ 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 [۹۷].



شکل ۱: 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 $15W$ 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 [۹۶]. در مقابل پالسه‌ای ورودی کوتاه‌تر، منجر به اثرات غیرخطی قوی‌تر و طیف خروجی پهن‌تر می‌شوند. بنابراین همانطور که در شکل دیده می‌شود، پالس ورودی با پهنای $1/1$ 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

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

و عملگر غیرخطی به صورت

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

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.

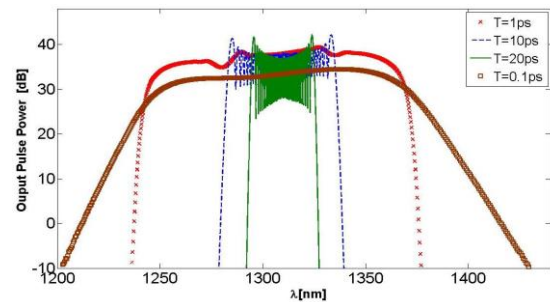
۳- نتایج و بحث های مربوطه

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 10.5 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 $\Lambda = 0.73 \mu m$ 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 $1310 nm$ با پهنای زمانی $2/5 ps$ و توان $15W$ به درون PCF فرستاده می‌شود. در شکل (۱) تغییرات طیف ابرپیوستار تولید شده برحسب توان‌های مختلف پالس ورودی با پهنای ثابت $2/5 ps$ 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 ps و توان ورودی 60 W در طول موج مرکزی 1310 nm به درون یک PCF به طول 100 m فرستاده شود، یک ابرپیوستار بسیار پهن و هموار (در حدود 200 nm) بدست می آید که منجر به وضوح طولی 3786 nm برای تصاویر OCT در دندانپزشکی خواهد شد.

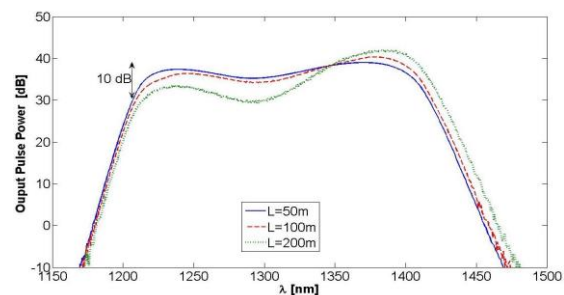
مراجع

- [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., Namihiro, 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 ps و توان ورودی 60 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. 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 0.1 ps و توان ورودی 60 W .

بنابراین برای یک PCF با طول 100 m و پالسی با پهنای 0.1 ps و توان ورودی 60 W به یک ابرپیوستار بسیار پهن در حدود 200 nm و بسیار هموار (با توجه به شکل برای 10 dB کاهش توان) دست می‌یابیم. این پهنای طیفی، معادل وضوح طولی برابر با 3786 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