بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

استفاده از رهیافت تزریق سیال در ساختار شش‌وجهی فیبر بلور فوتونی مبتنی بر ماده PBG-08 برای تولید طیف ابرپیوستار

مجتبی صراحی نوبر[۱] و علیرضا ملکی جوان[۲]

[۱]دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب- دانشکده برق- گروه مخابرات

[۲]دانشگاه هوایی شهید ستاری- دانشکده برق- گروه مخابرات

چکیده - هدف از این مقاله، مطالعه عددی پاشندگی فیبر بلور فوتونی با استفاده از رهیافت تزریق سیال نوری برای تولید طیف ابرپیوستار است. در این مقاله یک فیبر بلور فوتونی شش‌وجهی مبتنی بر ماده‌ی *PBG-08* شیشه‌ای نرم با تزریق ۵ سیال نوری مختلف درون حفره‌های ردیف اول اطراف هسته ارائه شده است. ماده اصلی تشکیل‌دهنده فیبر، شیشه *PBG-08* دارای پنجره عبور در محدوده طول موج ۰/۴ تا ۵ میکرومتر و ضریب شکستی بیشتر از سیلیکای مذاب (یعنی ۱/۹) است که تزریق سیال با ضریب شکست‌های ۱/۳ تا ۱/۸ را درون حفره‌ها امکان‌پذیر می‌سازد. برای ساختار ارائه شده ضریب شکست موثر، پاشندگی، سطح مقطع موثر و ضریب غیرخطی مُد اصلی برای زمانی که حفره‌های هوا توسط ۵ سیال متفاوت پُر می‌شوند مورد محاسبه قرار می‌گیرد. تزریق سیال نوری در حفره‌های ردیف اول با ایجاد مهندسی پاشندگی بر تغییر مقدار ضرایب خطی و غیرخطی تاثیرگذار است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند هنگامی‌که پالس نوری با عرض ۱۰۰ فمتوثانیه و طول‌موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر وارد فیبر بلور فوتونی که حفره‌های ردیف اول آن با تولوئن پر شده‌اند می‌شود در طول ۱۰ سانتی‌متر از فیبر (خروجی فیبر) طیفی ابرپیوستار و تخت تولید خواهد شد.

کلید واژه- پاشندگی ، طیف ابرپیوستار ، فیبر بلور فوتونی، تزریق سیال

Supercontinuum generation in hexagonal lattice PBG-08 photonic crystal fiber using optofluidic infiltration

M. Sorahi-nobar[1], A. Maleki-javan[1]
[1]Department of Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University
[2]Department of Electrical Engineering, Shahid Sattari university of Aeronautical Engineering

Abstract- The aim of this paper is to study the dispersion of PBG-08 soft glass photonic crystal fiber (PCF). We investigate the possibility of generating broad band optical supercontinuum, by means of infiltrating the air-holes adjacent to the core of a hexagonal lattice PCF, by optical fluids of 5 refractive indices. The advantage of using PBG-08 instead of silica is its larger both transparency window (0.4 to 5 μm) and refractive index (n_F=1.9) let us infiltrate holes with fluids range from 1.3 to 1.8. The effective refractive index, dispersion, effective area and nonlinear profiles of fundamental mode for PCF infiltrated with various fluids are studied. Simulations reveal, in response to launching 100 fs input pulses of 1kW peak powers, with near zero dispersion wavelength centered about λ_0 = 1550 nm, into 10-cm long PBG-08 PCF infiltrated by Toluene with (n_F=1.5), a flat and broad supercontinuum can be achieved.

Keywords: Dispersion, Supercontinuum generation, Photonic crystal fiber, Step index fiber, Optofluidic infiltration.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

۱- مقدمه

تولید یک پالس کوتاه با توان نسبتا بالا توسط یک لیزر و عبور آن از یک محیط انتشار با ظاهر شدن اثرات غیرخطی، طیف ابرپیوستار را تولید خواهد کرد [۱] طیف ابرپیوستار مشابه نور سفید دارای پهنای باند وسیع است با این تفاوت که خاصیت همدوسی مشابه یک لیزر را دارا و از شدت زیادی برخوردار است. برای دستیابی به طیف ابرپیوستار، فیبرهای بلور فوتونی با پاشندگی تخت پیشنهاد شده‌اند [۲, ۳] از کاربردهای طیف ابرپیوستار اندازه‌گیری دقیق فرکانس-های نوری است که در سال ۲۰۰۵ جایزه نوبل فیزیک را به خود اختصاص داد [۴]. همچنین در تصویربرداری برای سطوح حساس به صورت غیرنافذ در پزشکی نیز کاربردهای زیادی دارد [۵] تلفیق علم سیال نوری با ادوات بلور فوتونی (علم سیال نوری) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین علاقه‌های تحقیقاتی در سال‌های اخیر مطرح شده است. این تحقیق بر مبنای تزریق سیال نوری درون حفره‌های هوای فیبر بلور فوتونی استوار است. در این مقاله پس از محاسبه ضریب‌های خطی شامل پاشندگی سرعت گروه و سطح مقطع موثر مُد اصلی بر حسب طول‌موج، معادله حاکم بر انتشار موج یعنی معادله غیرخطی شرودینگر با استفاده از روش عددی فوریه مبتنی بر تفکیک گام حل و انتشار پالس نوری در طول ۱۵۵۰ نانومتر از فیبر بلور فوتونی محاسبه می‌شود. در حل این معادله پاشندگی مرتبه دوم تا مرتبه هفتم درنظر گرفته می‌شود.

۲- مدل انتشار موج درون فیبر

یک پالس نوری با پوش میدان الکتریکی A و فرکانس زاویه‌ای ω_0 در امتداد طول یک فیبر در راستای محور z منتشر می‌شود. پاسخ معادله‌ی شرودینگر غیرخطی نحوه‌ی انتشار پالس را توصیف می‌کند [۶]:

$$\frac{\partial A}{\partial z}+\frac{\alpha}{2}A+\sum_{n=1}^{4} i^{(n-1)}\frac{\beta_n}{n!}\frac{\partial^n A}{\partial t^n}=i\left(\gamma(\omega_0)+i\,\gamma_1\frac{\partial}{\partial t}\right)\times A(z,t)\int_{-\infty}^{\infty}R(t')\left|A(z,t-t')\right|^2 dt \qquad (۱)$$

که در آن t، α و β_n به‌ترتیب زمان، ضریب تلفات و ضریب پاشندگی مرتبه‌ی n، اند.

به‌علاوه اثرهای غیرخطی رامان، خودتیزی و کِر در فیبر مبتنی بر *PBG-08* با ضریب شکست غیرخطی برابر با $n_2= ۴/۳\times۱۰^{-۱۹}\ \mathrm{m^2\cdot W^{-1}}$ به‌ترتیب با عبارت‌های [۶]

$$R(t)=(1-f_R)\delta(t)+f_R h_R(t), \qquad (۲)$$

$\gamma(\omega_0)=n_2\omega_0/cA_{eff}(\omega_0)$ و $\gamma_1=\partial\gamma/\omega$ بیان می‌شوند، به‌طوریکه c سرعت انتشار نور در فضای آزاد [۶] و

$$A_{\mathrm{eff}}=\frac{\left(\int_{-\infty}^{+\infty}\int\left|F(x,y)\right|^2 dxdy\right)^2}{\int_{-\infty}^{+\infty}\int\left|F(x,y)\right|^4 dxdy} \qquad (۳)$$

سطح مقطع مؤثر برای مُد اصلی میدان نوری F است. به‌علاوه، در رابطه‌ی (۲) ثابت $f_R=$ ۰/۰۵ بیان کننده‌ی سهم تابع پاسخ رامان تاخیری [۶]

$$h_R(t)=\frac{\tau_1^2+\tau_2^2}{\tau_1^2\tau_2^2}\exp(-t/\tau_2)\sin(-t/\tau_2), \qquad (۴)$$

و $\delta(t)$ دلتای دیراک، $\tau_1=$ ۵/۵ fs، و $\tau_2=$ ۳۲ fs است.

در رابطه (۱)، ضریب پاشندگی مرتبه‌های یک، دو و بزرگتر به‌ترتیب برابر اند با [۷]:

$$\beta_1\equiv 1/v_g=n_g/c,\ \beta_2=\left(\lambda^2/2\pi c\right)D,\quad \beta_n=d^n\beta_{n-1}/d\,\omega^n\big|_{\omega\to\omega_0}^{n\geq 3} \qquad (۵)$$

که درآن v_g و n_g سرعت و ضریب شکست گروه در فیبر هستند، و

$$D\equiv-\frac{\lambda}{c}\frac{d^2n}{d\lambda^2},\quad n\equiv n_{\mathrm{eff}}+n_{\mathrm{m}} \qquad (۶)$$

پاشندگی سرعت گروه ناشی از وابستگی سرعت گروه به طول موج و n_m، و n_{eff} به‌ترتیب ضریب شکست‌های ماده و مؤثر در فیبر هستند. حال با در اختیار داشتن تک‌تک ضریب‌های رابطه (۱)، می‌توان آن را به‌طور عددی حل کرد. حل عددی این معادله با استفاده از روش فوریه با گام مجزا (SSFM) انجام شده است و نتایج آن در بخش بعد ارائه می‌شود.

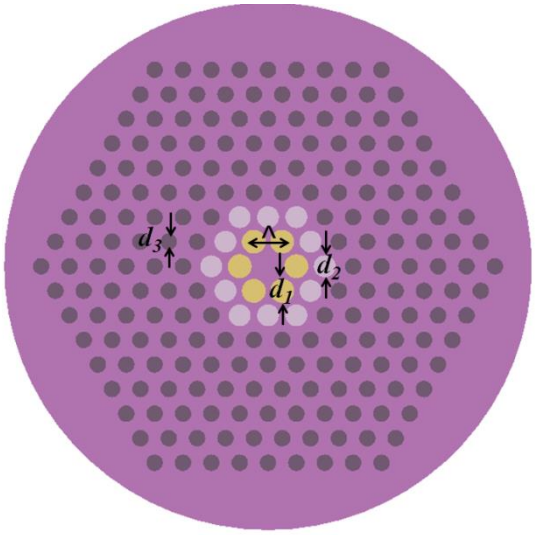
۳- ساختار پیشنهادی

شکل ۱ فیبر بلور فوتونی موردنظر به طول ۱۰ سانتی‌متر و سطح مقطع آن را با شبکه شش‌وجهی نمایش می‌دهد. دایره‌های خاکستری رنگ نمایانگر حفره‌های هوا هستند. ثابت شبکه‌ی فیبر، Λ ۲/۱۵ μm، برای حفره‌های ردیف اول $d/\Lambda=0.84$ و برای ردیف دوم $d/\Lambda=0.77$ و برای

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

مابقی ردیف‌ها $d/\Lambda = 0.58$ درنظر گرفته می‌شود. قطر هسته برابر μm ۲/۵ است. ساختار شامل ۶ حلقه از حفره‌های هوا و حفره‌های حلقه‌ی ردیف اول پُر شده از سیال نوری است. مرکز فیبر و اطراف دایره‌ها مبین ماده‌ی اصلی تشکیل دهنده‌ی فیبر و از جنس *PBG-08* است.



شکل ۱: شمای سطح مقطع فیبر بلور فوتونی موردنظر را نشان می‌دهد

ضریب شکست *PBG-08* برحسب طول موج مطابق رابطه *Sellmeier* برابر است با [۸]:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{2.915\lambda^2}{\lambda^2 - (210.6\times10^{-3})^2} + \frac{0.92\lambda^2}{\lambda^2 - (7.3\times10^{-6})^2} + \frac{-1.28\lambda^2}{\lambda^2 - (220.2\times10^{-3})^2} \quad (۷)$$

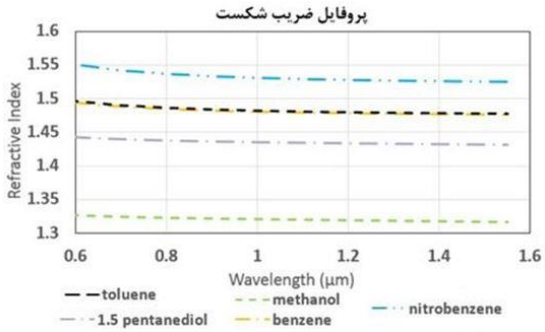
سیالاتی که در این مقاله به ساختار تزریق شده است عبارتند از:

متانول، تولوئن، ۱/۵ پنتان دیول، بنزن، نیتروبنزن

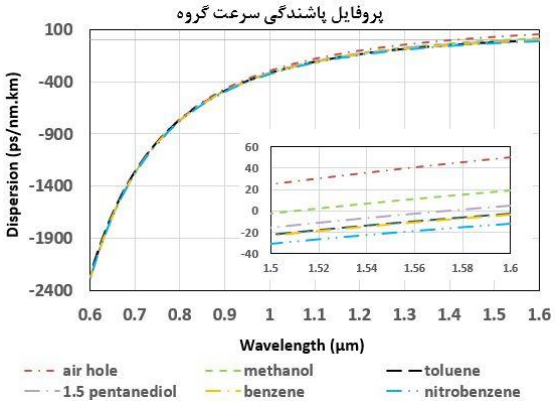
۴- نتایج شبیه سازی

ابتدا، پروفایل ضریب شکست ۵ سیال تزریق شده به ساختار در شکل ۲ آورده شده است. سپس توسط رابطه‌ی (۶) پروفایل پاشندگی سرعت گروه بر حسب طول موج برای هوا و این ۵ سیال تزریق شده حاصل می‌شود، پنجره‌ی شبیه‌سازی را از ۰/۶ تا ۱/۶ میکرومتر درنظر گرفته‌ایم که پروفایل پاشندگی سرعت گروه در شکل ۳ ترسیم شده است. سپس، منحنی‌های سطح مقطع موثر مُد اصلی در هرکدام از فیبرهای قبلی نیز برحسب طول موج سیگنال ورودی محاسبه و در شکل ۴ ترسیم شده‌اند.

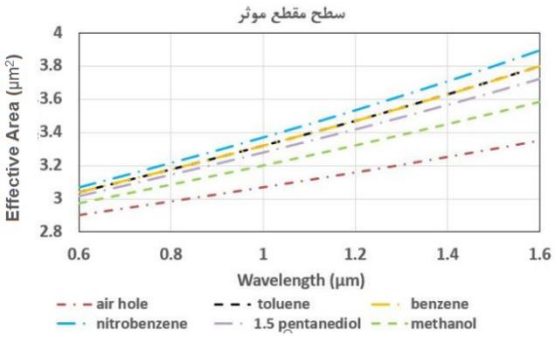
اکنون می‌توان تمام ضریب‌های لازم برای حل رابطه (۱) را برحسب طول موج و برای هر یک از سیال‌ها استخراج کرد. جدول ۱ ضرایب پاشندگی β_2 تا β_7 برای حالت بدون تزریق سیال و با تزریق سیال تولوئن برای طول موج ۱۵۵۰ نانومتر



شکل ۲: پروفایل ضریب شکست برحسب طول موج برای ۵ سیال تزریق شده



شکل ۳: مقایسه‌ی نمودار پاشندگی سرعت گروه برحسب طول موج



شکل ۴: مقایسه‌ی نمودار سطح مقطع موثر برحسب طول موج برای فیبر تزریق نشده با برای فیبرهایی که حفره‌های مجاور هسته‌ی آن‌ها با سیال‌های گوناگون تزریق شده‌اند.

در جدول ۱ آمده است.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

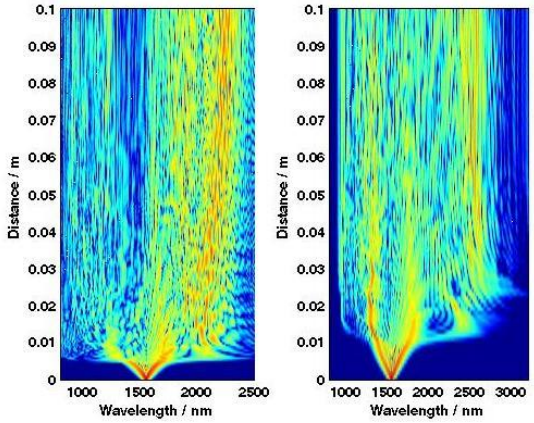
جدول ۱: پارامترهای شبیه سازی و مقادیر آن‌ها

ضریب پاشندگی	هوا	تولوئن
ضریب پاشندگی مرتبه ۲ (β_2)	$-۴/۹۲\times۱۰^{-۲۶}$	$۱/۵۲\times۱۰^{-۲۶}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۳ (β_3)	$۴/۹\times۱۰^{-۴۰}$	$۲/۸۹\times۱۰^{-۴۰}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۴ (β_4)	$-۹/۹۸\times۱۰^{-۵۵}$	$-۲/۴۶\times۱۰^{-۵۵}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۵ (β_5)	$۳/۳۴\times۱۰^{-۶۹}$	$۱/۶۲\times۱۰^{-۷۰}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۶ (β_6)	$-۱/۱۱\times۱۰^{-۸۳}$	$۱/۹۸\times۱۰^{-۸۴}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۷ (β_7)	$۳/۴۱\times۱۰^{-۹۸}$	$-۱/۲۳\times۱۰^{-۹۸}$

با استفاده از روش عددی فوریه با گام مجزا، رابطه‌ی (۱) برای سیگنال‌های ورودی با طول موج‌های گوناگون به‌طور عددی حل می‌شود. ضرایب غیرخطی شامل مدولاسیون فاز خودی (*SPM*)، اثر خودتیزی (SS) و اثر پراکندگی رامان(SRS) هستند. که به ترتیب منجر به گسترش نسبتاً متقارن طیف فرکانسی، گسترش نامتقارن طیف فرکانسی و انتقال طیف به سمت طول موج‌های بزرگتر خواهند شد [۷]. این معادله با استفاده از روش فوریه با تفکیک گام برای پالس نوری با توان ۵ kW، عرض پالس ۱۰۰ fs و طول موج مرکزی ۱۵۵۰nm در طول ۱۰ سانتی‌متر از فیبر حل شد که نتیجه آن تولید طیف ابرپیوستار برای هوا و تولوئن در شکل ۵ آورده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله فیبر بلور فوتونی مبتنی بر ماده PBG-08 پیشنهاد شد و نمایه‌های خطی شامل پاشندگی و غیرخطی شامل ضریب غیرخطی بر حسب طول‌موج برای هر یک از ساختارها محاسبه و رسم شدند. سپس با استفاده از مقادیر عددی مستخرج از نمایه‌های مذکور، معادله شرودینگر غیرخطی بازنویسی شد و برای طول‌موج پُمپ ورودی با استفاده از روش عددی SSFM حل و در حوزه فرکانس ترسیم شدند. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان دادند هنگامی‌که پالس ورودی با عرض ۱۰۰ فمتوثانیه و طول‌موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر وارد فیبر بلور فوتونی شود در طول ۱۰ سانتی‌متر از فیبرهای بلور فوتونی بدون تزریق سیال (هوا) و تزریق شده با تولوئن طیف ابرپیوستار تولید می‌شود.



هوا تولوئن

شکل ۵: نمایش تولید طیف ابرپیوستار در ۱۰cm از طول فیبر برای هوا و تولوئن

مراجع

[1] J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," Reviews of modern physics, vol. 78, p. 1135, 2006.
[2] K. Saitoh and M. Koshiba, "Highly nonlinear dispersion-flattened photonic crystal fibers for supercontinuum generation in a telecommunication window," Optics Express, vol. 12, pp. 2027-2032, 2004.
[3] A. Marandi, C. W. Rudy, V. G. Plotnichenko, E. M. Dianov, K. L. Vodopyanov, and R. L. Byer, "Mid-infrared supercontinuum generation in tapered chalcogenide fiber for producing octave-spanning frequency comb around 3 μm," Optics express, vol. 20, pp. 24218-24225, 2012.
[4] T. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology," Nature, vol. 416, pp. 233-237, 2002.
[5] G. Humbert, W. Wadsworth, S .Leon-Saval, J. Knight, T. Birks, P. St J Russell, et al., "Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fibre," Optics express, vol. 14, pp. 1596-1603, 2006.
[6] G. Agrawal, "Nonlinear fiber optics ",Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century, pp. 195-211, 2000.
[7] H. Saghaei, M. Ebnali-Heidari, and M. K. Moravvej-Farshi, "Midinfrared supercontinuum generation via As2Se3 chalcogenide photonic crystal fibers," Appl. Opt. 54, 2072–2079, 2015.
[8] D. Lorenc, M. Aranyosiova, R. Buczynski, R. Stepien, I. Bugar, A. Vincze, and D. Velic, "Nonlinear refractive index of multicomponent glasses designed for fabrication of photonic crystal fibers, " Appl. Phys. B 93, 531–538, 2008.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]