بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

تولید طیف ابرپیوستار در فیبر بلور فوتونی مبتنی بر شبکه مربعی با استفاده از رهیافت تزریق سیال نوری

حامد سقایی[۱]، فرشید کوهی کمالی[۱]، محمد کاظم مروج فرشی[۲] و مجید ابن علی حیدری[۳]

[۱] گروه مخابرات، دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات
[۲]گروه الکترونیک، دانشکده برق، دانشگاه تربیت مدرس
[۳]گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

چکیده - هدف این مقاله ارائه روشی نوین در تولید طیف ابرپیوستار نوری با بهره‌گیری از تزریق سیال نوری درحفره‌های مجاور هسته فیبربلور فوتونی با شبکه‌ی مربعی است. ابتدا با فرض دردست داشتن یک فیبربلور فوتونی با ساختار مربعی و امکان تزریق حفره های حلقه‌ی مجاور هسته‌ی آن با سیال‌های نوری با ضریب شکست‌های گوناگون پاشندگی فیبر به‌نحو مطلوب مهندسی می‌شود. آنگاه رفتار طیفی سیگنال خروجی از فیبر برحسب طول موج پالس نوری وارد شده به فیبر برای سیال‌های نوری با ضریب شکست‌های متفاوت شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد نمودارهای پاشندگی و اندازه‌ی سطح مقطع موثر فیبر برحسب طول موج سیگنال ورودی و درنتیجه ویژگی‌های طیف ابرپیوستار تولید شده در خروجی فیبر به‌طور محسوسی به اندازه‌ی ضریب شکست سیال تزریق شده بستگی دارد.

کلید واژه- طیف ابرپیوستار، فیبر بلور فوتونی، سیال نوری، مهندسی پاشندگی

Supercontinuum generation in square lattice photonic crystal fiber using optofluidic infiltration

H. Saghaei[1], F. Koohi-kamali[1], M. K. Moravvej-Farshi[2] and M. Ebnali-Heidari[3]
[1]Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran 1477893855, Iran
[2]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Advanced Device Simulation Lab, Tarbiat Modares University, PO Box 14115-194, Tehran, 1411713116 Iran
[3]Faculty of Engineering, Sharekord University, Sharekord, 8818634141, Iran

Abstract- The aim of this paper is to demonstrate the possibility of generating broad band optical supercontinum, by means of infiltrating the air-holes adjacent to the core of the a square lattice photonic crystal fiber (PCF), by optical fluids of various refractive indices. First, by infiltrating the air holes adjacent to the core of a square lattice PCF its dispersion profile is engineered. Then, by launching optical pulses of various wavelengths into the infiltrated PCFs, their outputs are simulated. Simulations show that profiles of the dispersion and the effective mode area versus the input wavelength and hence the spectral characteristics of the resulting supercontinum are sensitive to the refractive index of the optical fluid.

Keywords: Optofluidic infiltration, PCF, Supercontinuum generation, and Dispersion engineering.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

عبور پالس نوری کوتاه همدوس با توان نسبتا زیاد از یک محیط غیرخطی، می‌تواند طیف ابرپیوستار تولید کند[۱]. طیف ابرپیوستار علاوه بر در برداشتن گستره‌ی وسیعی از فرکانس‌های نوری همانند نور سفید، ویژگی همدوسی سیگنال ابتدایی را نیز حفظ می‌کند و از شدت زیادی برخوردار است. طیف ابرپیوستار کاربردهای زیادی در حوزه‌های مخابرات طیف گسترده (براساس دستیابی چندگانه با تخصیص کد نوری و جهش فرکانسی)، اندازه‌گیری دقیق فرکانس‌های نوری، و تصویر برداری برای سطوح حساس به صورت غیر نافذ در پزشکی دارد.
امکان تولید طیف ابرپیوستار در این دسته از فیبرها قبلا نمایش داده شده است. یکی از روش‌های گوناگون پیشنهادی برای گسترش طیف ابرپیوستار تولید شده توسط فیبر بلور فوتونی کاهش سطح مقطع فیبر با باریک‌تر (taper) کردن آن است [۳]. روش دیگر استفاده از مواد با ضریب غیرخطی بالاتر مانند چلکوجناید (Chalcogenide) به‌جای سیلیکا است [۴]. هر دو روش مذکور منجر به افزایش ضریب غیرخطی خواهند شد، اما پیاده سازی این دو روش به دلیل وابستگی به تکنولوژی ساخت کار چندان ساده‌ای نیست. روش جایگزین پیشنهادی این مقاله بهره‌گیری از رهیافت تزریق سیال نوری در حفره‌های هوای فیبر نوری بلور فوتونی است. پیاده‌سازی این روش به‌صورت عملی قبلا در بلورهای فوتونی نشان داده شده‌است [۵]. دراین مقاله ابتدا فیبر بلور فوتونی با ساختار مربعی به عنوان محیطی جهت تولید طیف ابرپیوستار درنظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود حفره‌های مجاور هسته‌ی فیبر با یک سیال نوری مطلوب تزریق شده باشند. سپس رفتار طیفی خروجی از فیبر تزریق شده را بر حسب طول موج پالس نوری وارد شده به آن و ضریب شکست سیال تزریق شده به‌طور عددی شبیه‌سازی و تحلیل می‌کنیم.

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]:

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

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 سیلیکا با ضریب شکست غیرخطی برابر با $n_2=$ ۲٫۷×۱۰$^{-۲۰}$ m^2·W^{-1} به‌ترتیب با عبارت‌های

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

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

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

سطح مقطع مؤثر.برای مد اصلی میدان نوری F است. به‌علاوه، در رابطه‌ی (۲) ثابت $f_R=$ ۰٫۱۸ بیان کننده‌ی سهم تابع پاسخ رامان تاخیری

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

و $\delta(t)$ دلتای دیراک، $\tau_1=$ ۱۲٫۲ fs، و $\tau_2=$ ۳۲ fs است.
در رابطه (۱)، ضریب پاشندگی مرتبه‌های یک، دو و بزرگتر به‌ترتیب برابر اند با [۷]:

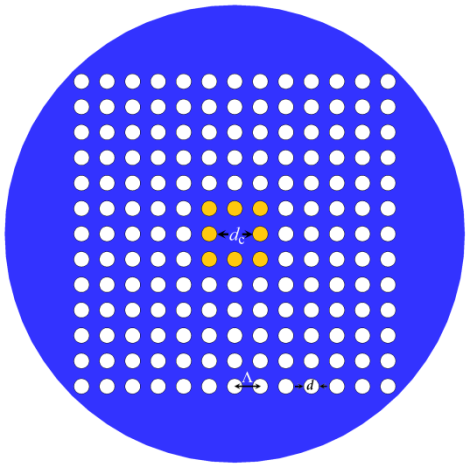
$$\beta_1\equiv 1/v_g=n_g/c,\ \beta_2=\left(\lambda^2/2\pi c\right)D,\quad \beta_n=d^n\beta_{n-1}/d\omega^n\Big|_{\omega\to\omega_0}^{n\geq 3} \quad (۵)$$

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

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

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 اند. حال با در اختیار داشتن تک تک 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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۱: شمای سطح مقطع فیبر بلور فوتونی سیلیکا، تیره‌ترین بخش (آبی رنگ) در مرکز و در اطراف حفره‌ها بدنه اصلی فیبر (سیلیکا) است. حفره‌های تیره (نارنجی) نشان دهنده حفره‌های تزریق شده با سیال نوری و حفره‌های سفید رنگ نشان دهنده نشان دهنده حفره‌های هوا است.

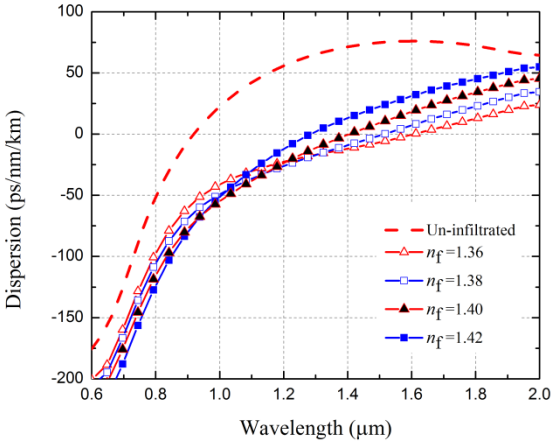
بعد ارائه می‌شود.

۳- ساختار پیشنهادی

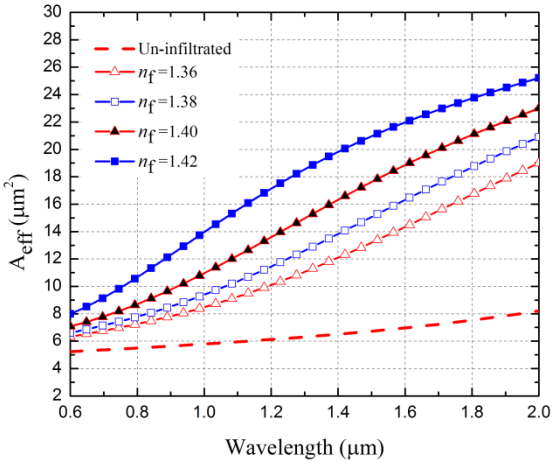
شکل ۱ شمای سطح مقطع فیبر بلور فوتونی با شبکه مربعی را نمایش می‌دهد. تیره‌ترین بخش‌ها (آبی) درمرکز فیبر و اطراف دایره‌ها نمایشگر ماده‌ی اصلی تشکیل دهنده‌ی فیبر و از جنس سیلیکا است. دایره‌های پررنگ (نارنجی) در مجاورت هسته‌ی فیبر نمایانگر حفره‌های تزریق‌شده، و دایره‌های سفید نشان دهنده‌ی حفره‌های هوا اند. ثابت شبکه‌ی فیبر ۲ µm و قطر حفره‌های هوا در آن ۱٫۲ µm و قطر هسته‌ی فیبر ۲٫۸ µm فرض شده است

۴- نتایج شبیه سازی

ابتدا، منحنی‌های پاشندگی سرعت گروه فیبر برحسب طول موج سیگنال نور ورودی برای فیبر تزریق نشده، و همچنین برای فیبرهایی که حفره‌های مجاور هسته آن‌ها با سیال‌های نوری با ضریب شکست‌های گوناگون (۱٫۴۲، ۱٫۴۰، ۱٫۳۸، ۱٫۳۶=n_f) تزریق شده‌اند محاسبه و رسم می‌شوند. شکل ۲ نتایج را مقایسه می‌کند. سپس، منحنی‌های سطح مقطع موثر مود اصلی در هرکدام از فیبرهای قبلی نیز برحسب طول موج سیگنال ورودی محاسبه و رسم می‌شوند. شکل ۳ این نتایج را نمایش می‌دهد. اکنون می‌توان تمام ضریب‌های لازم برای حل رابطه (۱) را برحسب طول موج و برای هر یک از سیال‌ها



شکل ۲: مقایسه‌ی نمودار پاشندگی سرعت گروه برحسب طول موج برای فیبر تزریق نشده با نمودارهای مشابه برای فیبرهایی که حفره های مجاور هسته‌ی آن‌ها با سیال‌های گوناگون (۱٫۴۲، ۱٫۴۰، ۱٫۳۸، ۱٫۳۶=n_f) تزریق شده اند.

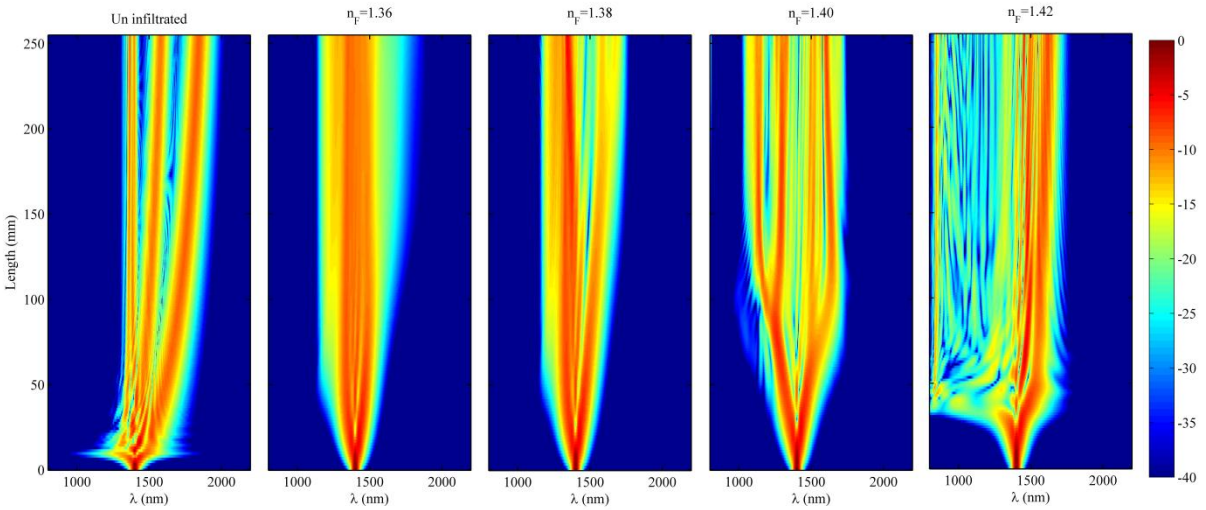


شکل ۳: مقایسه‌ی نمودار سطح مقطع موثر برحسب طول موج برای فیبر تزریق نشده با نمودارهای مشابه برای فیبرهایی که حفره‌های مجاور هسته‌ی آن‌ها با سیال‌های گوناگون (۱٫۴۲، ۱٫۴۰، ۱٫۳۸، ۱٫۳۶=n_f) تزریق شده اند.

استخراج کرد.

سپس، با استفاده از روش عددی فوریه با گام مجزا، رابطه (۱) برای سیگنال‌های ورودی با طول موج‌های گوناگون به‌طور عددی حل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۴ نمایش داده شده است. دقت شود که جهت ظهور آثار غیرخطی در فیبر بلور فوتونی ساخته شده از سیلیکا (فیبر مورد بررسی در این مقاله) باید از لیزرهای توان بالا در ورودی استفاده نمود که در این مقاله از لیزری با توان ورودی ۴٫۷۱ kW و طول موج ۱۴۲۰nm استفاده شده است. مطابق رابطه‌ی (۱)، ضرایب خطی و غیرخطی بر انتشار پالس در طول فیبر تاثیر گذارند که ضرایب خطی شامل تلفات و پاشندگی سرعت گروه هستند و به ترتیب

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



شکل ۴: نمایش تولید طیف ابرپیوستار در ۲۵۰mm از طول فیبر برای حالت‌های مختلف شامل حالتی که سیال درون حفره‌های ردیف اول تزریق نشده و حالت‌هایی که سیال‌هایی با ضریب شکست‌های ۱٫۳۶، ۱٫۳۸، ۱٫۴۰ و ۱٫۴۲ درون حفره‌های ردیف اول تزریق شده‌اند.

منجر به کاهش شدت پالس و پهن شدگی زمانی آن خواهند شد. 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]. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود در ابتدای تولید طیف ابرپیوستار در طول فیبر، طیف فرکانسی به صورت نسبتاً متقارن پهن می‌شود که این پدیده ناشی از اثر مدولاسیون فاز خودی است سپس اثر خودتیزی از تقارن طیفی آن کاسته و در انتهای طول فیبر نیز اثر پراکندگی رامان، طیف را با شدت بیشتری به سمت طول موج‌های بالاتر سوق می‌دهد. دقت شود که جهت مشاهده اثر مدولاسیون فاز خودی که مهمترین اثر غیرخطی است ضروری است تا طول غیرخطی (L_{NL}) از طول فیبر کوچک‌تر باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار فیبر بلور فوتونی با شبکه مربعی مبتنی بر رهیافت تزریق سیال نوری جهت تولید طیف ابرپیوستار پیشنهاد شده‌است. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که تزریق سیال نوری در حفره‌های ردیف اول فیبر بلور فوتونی با مهندسی و تغییر در پروفایل‌های پاشندگی سرعت گروه و سطح مقطع موثر فیبر هم در ضرایب خطی و هم غیرخطی تاثیر گذاراند و در خروجی فیبر، نیز طیف ابرپیوستار مطلوبی را ایجاد می‌کنند که در حوزه مخابرات طیف گسترده‌ی مبتنی بر جهش فرکانسی کاربرد زیادی دارد.

مراجع

[۱] R. R. Alfano, "The supercontinuum laser source," 1989.

[۲] J. M. Dudley and S. Coen, "Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers," *Optics letters*, vol. 27, pp. 1180-1182, 2002.

[۳] 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.

[٤] J. Hu, C. R. Menyuk, L. B. Shaw, J. S. Sanghera, and I. D. Aggarwal, "Maximizing the bandwidth of supercontinuum generation in As< sub> 2</sub> Se< sub> 3</sub> chalcogenide fibers," *Optics express*, vol. 18, pp. 6722-6739, 2010.

[٥] C. Monat, P. Domachuk, and B. Eggleton , "Integrated optofluidics: A new river of light," *Nature photonics*, vol. 1, pp. 106-114, 2007.

[٦] G. Agrawal, "Nonlinear fiber optics," *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century*, pp. 195-211, 2000.

[٧] G. P. Agrawal, "Applications of nonlinear fiber optics," *Publishing House of Electronics Industry, Beijing*, 2002.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]