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

تولید طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی در فیبر بلور فوتونی مبتنی بر سیلیکا در ناحیه پاشندگی نرمال

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

[۱] دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات- دانشکده برق- گروه مخابرات

[۲]دانشگاه تربیت مدرس- دانشکده برق- گروه الکترونیک

[۳]دانشگاه شهرکرد- دانشکده فنی و مهندسی- گروه برق

چکیده - در این مقاله یک فیبر بلورفوتونی مبتنی بر سیلکا جهت تولید طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی ارائه می‌شود که در آن با انتخاب صحیح تعداد حلقه‌های هوا و ابعاد فیبر شامل قطر حفره و ثابت شبکه، پروفایل‌های خطی شامل پاشندگی و تلفات به شکل مطلوبی کنترل و مهندسی می‌شوند و ضریب غیرخطی بالایی حاصل می‌شود. نتایج شبیه سازی عددی نشان می‌دهند برای پالس نوری با توان *kW* ۶۰، عرض پالس *fs* ۵۰ و طول موج مرکزی *nm*۶۳۳ در بخش پاشندگی نرمال، طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی در *mm* ۲۰ از فیبر تولید خواهد شد.

کلید واژه- پاشندگی نرمال، تولید طیف ابرپیوستار، فیبر بلور فوتونی، نور مرئی.

Visible supercontinuum generation in silica-based photonic crystal fiber in normal dispersion regime

H. Saghaei[۱], M. K. Moravvej-Farshi[۲], and M. Ebnali-Heidari[۳]

[۱]Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran ۱۴۷۷۸۹۳۸۵۵, Iran

[۲]Faculty of Electrical and Computer Engineering, Advanced Device Simulation Lab, Tarbiat Modares University, PO Box ۱۴۱۱۵-۱۹۴, Tehran, ۱۴۱۱۷۱۳۱۱۶ Iran

[۳]Faculty of Engineering, Sharekord University, Sharekord, ۸۸۱۸۶۳۴۱۴۱, Iran

Abstract- In this paper, we propose a silica-based photonic crystal fiber (PCF) for visible supercontinuum generation. We, first engineer and optimize both dispersion and nonlinear parameters by varying the air-holes diameter, lattice constant and the number of air-holes rings. Then simulation results demonstrate that by launching an optical pulse with ۵۰ fs time width, ۶۰ kW peak power and center wavelength of ۶۳۳ nm in normal dispersion region of the fiber into a ۲۰-mm long PCF, a supercontinuum in visible region can be obtained at the end of the fiber.

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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

۱- مقدمه

طیف ابرپیوستار طیفی همدوس با پهنای باند وسیع است که با عبور یک پالس کوتاه با توان بالا از یک محیط غیرخطی مشابه فیبر بلور فوتونی تولید خواهد شد [۱]. تولید طیف ابرپیوستار بر مبنای فیبر بلور فوتونی نیازمند مدیریت دقیق پاشندگی و کنترل پارامترهای غیرخطی است [۲]. محققین ساختارهای متنوعی از فیبرهای بلور فوتونی جهت تولید بهتر طیف ابرپیوستار پیشنهاد داده‌اند که می‌توان به تیپرد کردن فیبر[۳] ، تغییر اندازه حفره‌های هوا و ثابت شبکه [۴]، تغییر چیدمان ساختار حلقه‌ها، تغییر تعداد آن‌ها همچنین، تغییر شکل حفره‌های هوا [۵] استفاده از مواد با ضریب خطی و غیرخطی بالاتر به جای سیلیکا مشابه شیشه‌های چلکوجناید، بیسموت، فلوراید و تلوریت [۶] و رهیافت تزریق سیال نوری در حفره‌های هوای فیبر نوری [۷, ۸] اشاره نمود. تولید طیف ابرپیوستار کاربردهای زیادی در علوم مختلف دارد که کاربرد جدیدی از آن، تولید نور مرئی (نور سفید) است. تولید نور سفید نیازمند حضور مولفه‌های فرکانسی به صورت پیوسته در محدوده طول موج‌های ۳۹۰ الی ۷۰۰ نانومتر است [۹]. محققین با استفاده از فیبرهای لانه زنبوری به تولید طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی می پردازند که مشکل آن‌ها پیچیدگی در ساخت است [۲] با توجه به این‌که مولفه‌های طیفی ایجاد شده شدت یکسانی ندارند یا در طول‌های زیادی از فیبر بلور فوتونی آثار خود را نشان می‌دهند بنابراین بهتر است با مهندسی هوشمندانه پاشندگی و کنترل پارامترهای غیرخطی، ساختاری برای فیبر ارائه شود تا طیف همواری در محدوده طول موج نور مرئی در طول چند ده میلی‌متر از آن حاصل شود که اهداف این مقاله را تشکیل می‌دهند.

۲- مدل انتشار پالس نوری درون فیبر

پالس نوری با پوش میدان الکتریکی A و فرکانس زاویه‌ای ω. که درون یک فیبر در راستای محور z منتشر می‌شود توسط معادله‌ی شرودینگر غیرخطی توصیف می‌شود[۱۰]

(۱)

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

که در آن t، α، و β_n به‌ترتیب زمان، ضریب تلفات و ضریب پاشندگی مرتبه‌ی n، هستند. به‌علاوه اثرهای غیرخطی رامان، خودتیزی، و کِر در فیبر سیلیکا با ضریب شکست غیرخطی به‌ترتیب برابر با عبارت‌های [۱۰]

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

$\gamma(\omega_0)=n_2\omega_0/cA_{eff}(\omega_0)$ و $\gamma_1=\partial\gamma/\omega$ هستند که در آن n_2= ۲٫۷×۱۰$^{-۲۰}$ m^{۲}·W$^{-۱}$ ، c سرعت انتشار نور در فضای آزاد و

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

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 و δ(t) دلتای دیراک است. h_R(t) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۰].

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

که τ_1= ۱۲٫۲ fs، و τ_2= ۳۲ fs هستند. در رابطه (۱)، ضریب پاشندگی مرتبه‌های یک، دو و بزرگتر به‌ترتیب برابر با

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

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

$$D\equiv-\frac{\lambda}{c}\frac{d^2\,\text{Re}\{n_{\text{eff}}(\lambda)\}}{d\lambda^2} \qquad (۶)$$

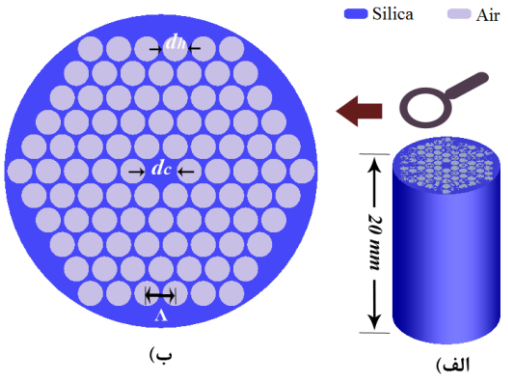
پاشندگی سرعت گروه ناشی از وابستگی سرعت گروه به طول موج و n_{eff} ضریب شکست مؤثر فیبر است. حال با در اختیار داشتن تک تک ضریب‌های رابطه (۱)، می‌توان آن را با استفاده از روش فوریه با تفکیک گام (SSFM) در هر طول از فیبر حل عددی نمود که نتایج آن در بخش چهارم ارائه می‌شوند.

۳- ساختار پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

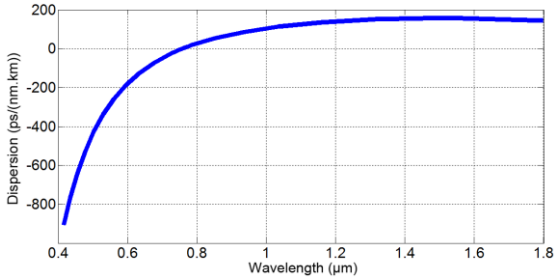
همانگونه که در مقدمه بیان شد، کنترل و مدیریت همزمان پارامترهای پاشندگی و غیرخطی در تولید طیف ابرپیوستار امری ضروری است. از آنجایی که هدف این

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

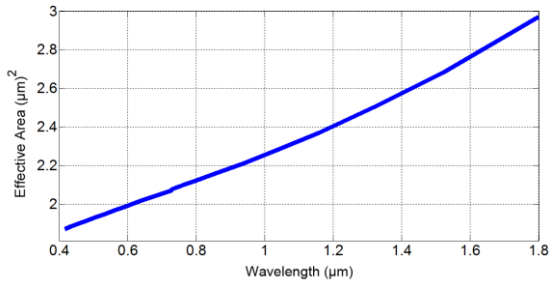
مقاله تولید طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی است بنابراین کنترل و مدیریت پاشندگی در محدوده مذکور انجام می‌شود. شکل ۱-الف و ب به ترتیب فیبر بلور فوتونی مورد نظر به طول ۲۰ میلی‌متر و سطح مقطع آن را با شبکه شش وجهی نمایش می‌دهد. تیره‌ترین بخش‌ها به رنگ آبی در مرکز فیبر و اطراف دایره‌ها مبین ماده‌ی اصلی تشکیل دهنده‌ی فیبر و از جنس سیلیکا است. دایره‌های خاکستری رنگ نمایانگر حفره‌های هوا هستند. ثابت شبکه‌ی فیبر، Λ، ۱٫۸ μm، قطر حفره‌های هوا، d_h ، ۱٫۶ μm و قطر هسته‌ی فیبر، dc، ۲ μm در نظر گرفته شده‌اند که دلیل آن حاصل شدن سطح مقطع موثر کوچک و در نهایت ضریب غیرخطی بالا حول طول موج منبع ورودی است. با در نظر گرفتن ضریب شکست سیلیکا بر حسب طول موج مطابق رابطه Sellmeier، با استفاده از روش عددی FDTD ضریب شکست موثر فیبر در هر طول موج محاسبه می‌شود سپس توسط رابطه (۶) پروفایل پاشندگی بر حسب طول موج حاصل می‌شود که در شکل ۲ ارائه شده است. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، شکل ۳ سطح مقطع موثر فیبر بر حسب طول موج را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه $\gamma(\omega_0) = n_2\omega_0/cA_{eff}(\omega_0)$ ضریب غیر خطی در هر طول موج محاسبه می‌شود که مقادیر محاسبه شده در شکل ۴ ارائه شده‌اند. اکنون به بررسی رفتار پالس نوری در طول فیبر بلور فوتونی می‌پردازیم. همان‌طور که در بخش دوم بیان شد انتشار پالس نوری درون فیبر توسط معادله



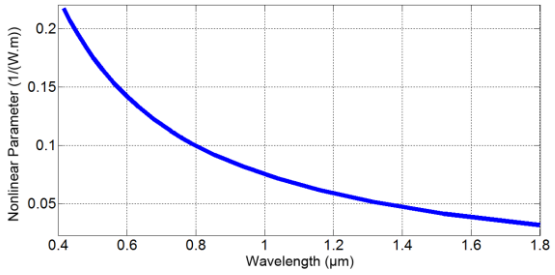
شکل ۱: الف) فیبر بلور فوتونی به طول ۲۰ میلی‌متر ب) برش عرضی از سطح مقطع فیبر که حفره‌های هوا با رنگ خاکستری از ماده اصلی تشکیل دهنده فیبر، سیلیکا (رنگ آبی) متمایز شده‌اند و ثابت شبکه‌ی فیبر، Λ، ۱٫۸ μm، قطر حفره‌های هوا، d_h ، ۱٫۶ μm و قطر هسته‌ی فیبر، dc، ۲ μm هستند.



شکل ۲: پاشندگی بر حسب طول موج برای فیبر شکل ۱.



شکل ۳: سطح مقطع موثر بر حسب طول موج برای فیبر شکل ۱.



شکل ۴: ضریب غیر خطی بر حسب طول موج برای فیبر شکل ۱.

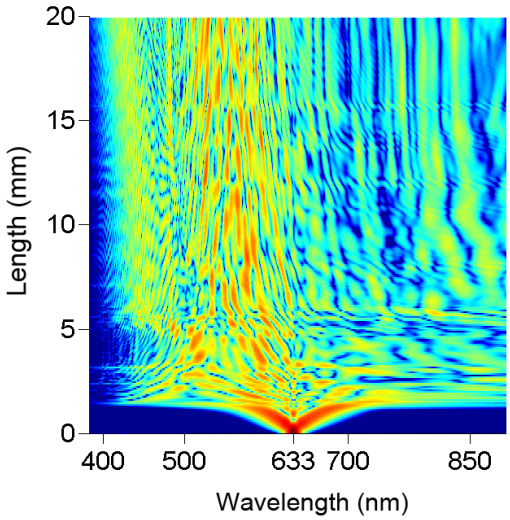
غیرخطی شرودینگر بیان می‌شود و برای حل آن استخراج ضرایب معادله از پروفایل‌های حاصل شده در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ در طول موج لیزر ورودی ضروری است که این ضرایب در طول موج ۶۳۳ نانومتر از لیزر ورودی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. پس از بازنویسی معادله، به حل آن با استفاده از روش عددی فوریه با تفکیک گام (SSFM) پرداخته خواهد شد که نتایج شبیه‌سازی عددی در طول۲۰ میلی‌متر از فیبر مطابق شکل ۵ نشان داده شده‌اند. در این مقاله طول موج منبع ورودی در ناحیه پاشندگی نرمال در نظر گرفته شده است که مقدار پاشندگی در این طول موج برابر با *ps/nm.Km* ۱۲۶- است. با توجه به مقدار زیاد پاشندگی نرمال پدیده غالب جهت ایجاد طیف ابرپیوستار مدولاسیون فاز خودی و پراکندگی برانگیخته رامان است. نسبت به تحقیقات دیگر در این زمینه این مقاله دارای چندین مزیت است اول اینکه طول موج پمپ در ناحیه پاشندگی نرمال است. دوم، طول فیبر در حدود ۲۰ میلی‌متر است که در مقایسه

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]

با فیبرهای بلور فوتونی ارائه شده در سایر مقاله‌ها که طول آنها چند ده سانتی‌متر بود، ساخت آن را ساده‌تر می‌کند و سوم موجود بودن لیزر ورودی با طول موجی در حدود ۶۳۳ نانومتر و بیشینه توان ۶۰ کیلووات است. البته نکته‌ای که باید به آن اشاره نمود تولید طیف ابرپیوستار علاوه بر محدوده نور سفید در محدوده مادون قرمز است هر چند شدت آن ناچیز است اما می‌توان با استفاده از فیلترهای RG ۸۵ و یا BG ۱۸ در انتهای فیبر به سادگی آن‌ها را حذف نمود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا یک فیبر بلور فوتونی با ابعاد مهندسی شده ارائه شد. سپس پروفایل پاشندگی و ضریب غیرخطی آن بر حسب طول موج با استفاده از روش عددی مبتنی بر FDTD محاسبه و رسم شدند. با استخراج ضرایب از منحنی‌های ارائه شده معادله شرودینگر غیرخطی حاکم بر انتشار پالس نوری بازنویسی شد. سپس این معادله با استفاده از روش فوریه با تفکیک گام برای پالس نوری با توان ۶۰ kW، عرض پالس ۵۰ fs و طول موج مرکزی ۶۳۳nm در طول ۲۰ میلی‌متر از فیبر حل شد که نتیجه آن تولید طیفی ابرپیوستار در محدوده نور مرئی در انتهای فیبر است.



شکل ۵: طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی در طول ۲۰ میلی‌متر از فیبر بلور فوتونی.

جدول ۱: ضریب غیرخطی و مقادیر مرتبه‌های مختلف پاشندگی در ۶۳۳ نانومتر طول موج لیزر ورودی

نام	نماد	مقدار
ضریب غیرخطی	γ	$۰٫۱۳۳ W^{-1}.m^{-1}$
ضریب پاشندگی مرتبه ۲	β_2	$۲٫۶۹\times۱۰^{-۲۶} s^2/m$
ضریب پاشندگی مرتبه ۳	β_3	$۴٫۳۸\times۱۰^{-۴۱} s^3/m$
ضریب پاشندگی مرتبه ۴	β_4	$-۱٫۸۸\times۱۰^{-۵۶} s^4/m$
ضریب پاشندگی مرتبه ۵	β_5	$۲٫۸۳\times۱۰^{-۷۱} s^5/m$
ضریب پاشندگی مرتبه ۶	β_6	$-۳٫۶۶\times۱۰^{-۸۶} s^6/m$
ضریب پاشندگی مرتبه ۷	β_7	$۶٫۸۶\times۱۰^{-۱۰۱} s^7/m$

مراجع

[۱] A. Husakou, and J. Herrmann, “Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers,” *Phy. Rev. Lett.*, vol. ۸۷, no. ۲۰, pp. ۲۰۳۹۰۱, ۲۰۰۱.

[۲] P. Russell, “Photonic crystal fibers,” *Sci.*, vol. ۲۹۹, no. ۵۶۰۵ ,pp. ۳۵۸-۳۶۲, ۲۰۰۳.

[۳] J. Cascante-Vindas, A. Diez, J. Cruz, M. Andrés, E. Silvestre, J. Miret, and A. Ortigosa-Blanch, “Tapering photonic crystal fibres for supercontinuum generation with nanosecond pulses at ۵۳۲ nm,” *Opt. Comm.*, vol. ۲۸۱, no. ۳, pp. ۴۳۳-۴۳۸, ۲۰۰۸.

[٤] J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, “Supercontinuum generation in photonic crystal fiber,” *Rev. Mod. Phy.*, vol. ۷۸, no. ٤, pp. ۱۱۳۵, ۲۰۰٦.

[۵] M. Yan, and P. Shum, “Air guiding with honeycomb photonic bandgap fiber ”,*Pho. Tech. Lett., IEEE*, vol. ۱۷, no. ۱, pp. ٦٤-٦٦, ۲۰۰۵.

[٦] J. Hu, C. Menyuk, L. Shaw, J. Sanghera, and I. Aggarwal, "Supercontinuum generation in an As۲Se۳-based chalcogenide PCF using four-wave mixing and soliton self-frequency shift." pp. ۱-۳.

[۷] M. Ebnali-Heidari, F. Dehghan, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali, and M. Moravvej-Farshi, “Dispersion engineering of photonic crystal fibers by means of fluidic infiltration,” *Journal of Mod. Opt.*, vol. ۵۹, no. ۱٦, pp. ۱۳۸٤-۱۳۹۰, ۲۰۱۲.

[۸] M. Ebnali-Heidari, H. Saghaei, F. Koohi-Kamali, M. Naser-Moghadasi, and M. K. Moravvej-Farshi, “Proposal for Supercontinuum Generation by Optofluidic Infiltrated Photonic Crystal Fibers,” *Sel. Top. Quant. Elect., IEEE Journal of*, vol. ۲۰, no. ۵.۲۰۱٤ ,

[۹] J. M. Stone, and J. C. Knight, “Visibly “white” light generation in uniform photonic crystal fiber using a microchip laser,” *Opt. Exp.*, vol. ۱٦, no. ٤, pp. ۲٦۷۰-۲٦۷۵, ۲۰۰۸.

[۱۰] G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*: Springer, ۲۰۰۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-30]