

ارائه ساختاری جدید از فیبر بلور فوتونی به منظور بهبود تولید طیف ابرپیوستار

محمود صیفوری^۱، رحمان کلهر^۲

^۱استادیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی برق

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، دانشکده مهندسی برق، r_kalhor101@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۲۲

چکیده

در این مقاله ساختاری از فیبر بلور فوتونی شش وجهی با هسته سیلیکا و قطر حفره‌های نابرابر هوایی پیشنهاد می‌شود که با مصالحه انجام گرفته بین پاشیدگی، مساحت مود موثر، تعداد مودها و تلفات تحدید، مراتب بالای پاشیدگی به شدت کاهش یافته و پاشیدگی تخت نزدیک صفر با مقدار بیشینه 0.7 (ps/nm.km) در ناحیه پاشیدگی غیرعادی از طول موج 1.2 میکرومتر تا 1.6 میکرومتر ، حالت انتشار تک مود حاصل شده و با عبور یک پالس لیزری 28 فمتوثانیه‌ای و توان بیشینه 5 کیلو وات در چنین فیبری به طول 15 سانتی متر ، طیف خروجی ابرپیوستار در محدوده پنجره مخابراتی $1/4 \text{ میکرومتر}$ تا $1/62 \text{ میکرومتر}$ شبیه سازی شده است.

کلیدواژه

ابرپیوستار، انتشار تک مود، پاشیدگی تخت، فیبر بلور فوتونی.

مقدمه

طرفی با کاهش سرعت زاویه‌ای در طول موج‌های بلند، ضریب غیرخطی طبق رابطه ۱ کاهش می‌یابد، با این وجود در این مقاله مصالحه‌ای صورت گرفته است که در محدوده طول موج‌های مخابراتی در حالت انتشار تک مود، کمترین مقدار پاشیدگی و مساحت مود موثر حاصل و ساختاری طراحی شده است که ضریب غیرخطی آن، $0.19 \text{ (W}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ است و سعی شده با کاهش پاشیدگی و ایجاد شیب پاشیدگی تخت، اثرات غیرخطی غالب شوند.

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \omega}{C \cdot A_{\text{eff}}} \quad (1)$$

n_2 ضریب شکست غیرخطی، ω سرعت زاویه‌ای پالس ورودی، C ، سرعت نور و A_{eff} مساحت مود موثر است [۱].

تأثیر پاشیدگی و اثرات غیرخطی در فیبر بلور فوتونی

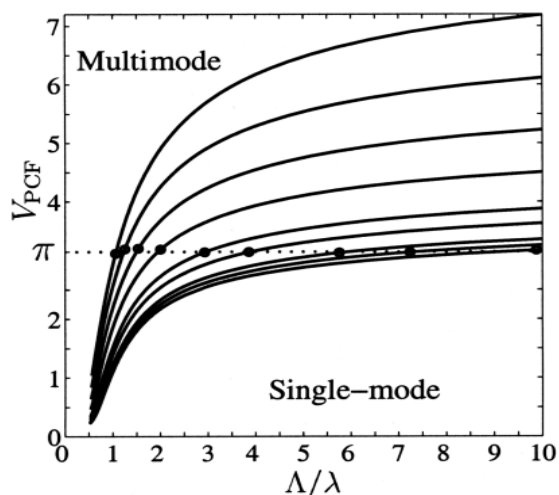
مهندسی پاشیدگی و کنترل پارامترهای غیرخطی و داشتن دو طول موج صفر پاشیدگی و ناحیه وسیع عملکرد تک مود، از خواص ویژه فیبر بلور فوتونی است و با داشتن سطح مقطع موثر کوچکتر در مقایسه با فیبرهای متداول، نه تنها خاصیت تک مود بودن را حفظ می‌نماید، بلکه محیطی واسط جهت ظهور آثار غیر خطی با توان آستانه کوچکتر ایجاد می‌کند [۴]. طبق شکل ۱ با

طیف ابرپیوستار یک طیف همدوس با پهنای باند وسیع است که با عبور یک پالس فوق العاده باریک با توان نسبتا بالا، از یک فیبر نوری، به دلیل ظاهر شدن اثرات غیرخطی در آن، تولید می‌شود. از این طیف پهن جهت تولید نور مرئی، عکسبرداری پزشکی از قسمتهای حساس بدن در محدوده مادون قرمز، منبع پالس کانال‌های بسیار باریک سیستم‌های مخابراتی مولتی پلکس تقسیم طول موج^۱ و طیف سنجی استفاده می‌شود [۱]. بهینه سازی این طیف با فیبر بلور فوتونی^۲ و کنترل دو پارامتر پاشیدگی^۳ و اثرات غیر خطی، امکان پذیر است. برای رسیدن به پاشیدگی تخت، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها ایجاد ساختار متناوب پوشش در فیبرهای بلور فوتونی است [۲]. روش بعدی ایجاد ردیف‌های نابرابر حفره‌های هوایی است در حالی که نسبت ثابت شبکه در آنها یکسان است [۳]. نسبت قطر حفره‌های هوا به ثابت شبکه باید کوچکتر باشد تا پاشیدگی تخت نزدیک صفر حاصل شود و نیازمند تعداد زیادی از حفره‌های هوایی است [۲]. در طول موج‌های کوتاه، نور در هسته متمرکز می‌شود و مساحت مود موثر کاهش می‌یابد ولی در طول موج‌های بلند، به سمت حفره‌های هوایی متمایل و مساحت مود موثر افزایش می‌یابد. از

1 Wavelength Division Multiplexing (WDM)

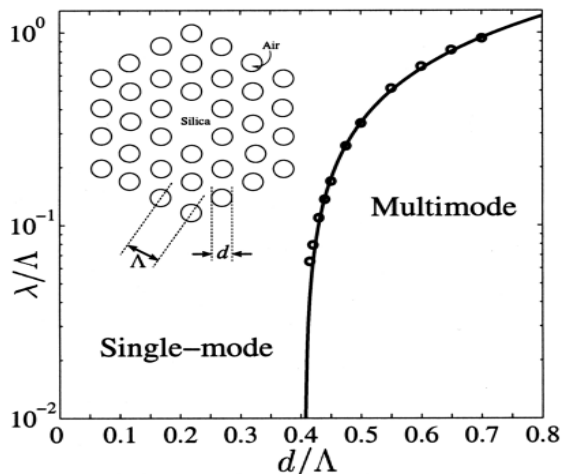
2 Photonic Crystal Fiber (PCF)

3 Dispersion



شکل ۲. مرز ناحیه عملکرد تک مود و چند مود در فرکانس نرمالیزه و نسبت وابستگی آن به طول موج و ثابت شبکه [۶].

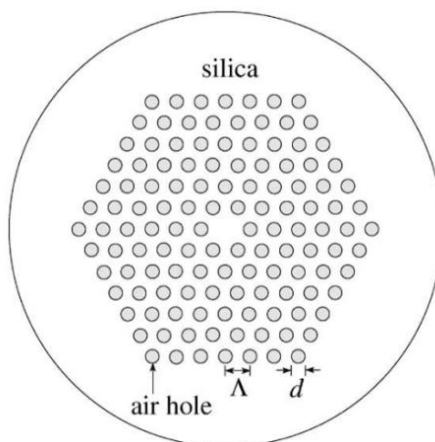
در طول موج‌های بلندتر نسبت به ثابت شبکه طبق شکل ۳ فیبر همواره عملکرد تک مود خواهد داشت [۶].



شکل ۳. مرز ناحیه عملکرد تک مود و چند مود و نسبت وابستگی آن به دو پارامتر $d/\Lambda, \lambda/\Lambda$ [۶].

پدیده‌های غیرخطی در اثر شدت پرتو پالس ورودی بوجود می‌آیند. موج در محیط‌های غیرخطی، مطابق معادله ۷ منتشر می‌شود که معادله غیرخطی شرودینگر نام دارد. حل این معادله با فرض برخی نکات، بصورت عددی روش تفکیک گام فوریه^۷ امکان‌پذیر است و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله، تلفات، مراتب بالای پاشیدگی، مدولاسیون خودفازی^۸ پراکندگی رامان^۹ و اثر خودتیزی^{۱۰} را به خوبی نشان می‌دهد [۸ و ۹].

کنترل و تغییر قطر حفره‌های هوایی^۴ (d) و فاصله مرکز تا مرکز آنها که ثابت شبکه (Λ) نامیده می‌شود، اثرات غیر خطی و ضرایب پاشیدگی تغییر می‌کنند [۵].



شکل ۴. نمایه فیبر بلور فوتونی شش وجهی [۵].

از لحاظ ریاضی اثرات پاشیدگی فیبر به وسیله بسط انتشار مود β به صورت سری تیلور حول فرکانس مرکزی ω₀ طبق رابطه ۲ در نظر گرفته می‌شود.

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \beta_3(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (2)$$

β₂ عامل اصلی پهن شدن و پاشیدگی سرعت گروه β_m طبق رابطه ۳ شامل ضرایب مرتبه بالاتر پاشیدگی است [۱].

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta(\omega)}{d \omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

با تغییر و کنترل قطر حفره‌ها و ثابت شبکه می‌توان از رابطه ۴ فرکانس نرمالیزه را مشخص کرد.

$$V_{PCF} = \frac{2\pi\Lambda \sqrt{n_c^2 - n_{cl}^2}}{\lambda} \quad (4)$$

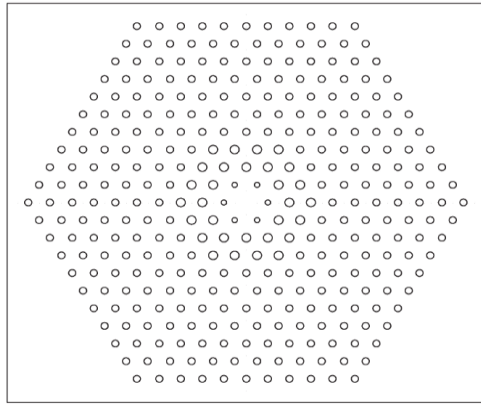
در این رابطه، V فرکانس نرمالیزه، Λ ثابت شبکه، n_c ضریب شکست هسته و n_{cl} ضریب شکست پوشش است. شرط انتشار تک مود، طبق شکل ۲ و ۳ برقراری رابطه ۵ و ۶ است [۱].

$$V_{PCF} < \pi \quad (5)$$

$$\frac{d}{\Lambda} < 0.4 \quad (6)$$

6 Non Linear Schrodinger Equation(NLSE)
7 Split-Step-Fourier Method(SSFM)
8 Self Phase Modulation(SPM)
9 Stimulated Raman Scattering(SRS)
10 Self Steepening (SS)

4 Hole-Size
5 Lattice Constant

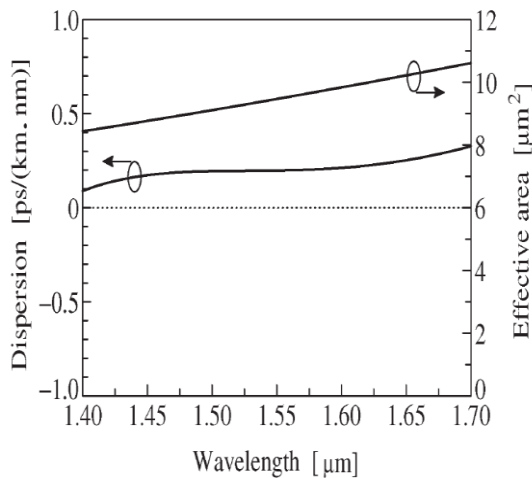


شکل ۴. نمایه سطح مقطع فیبر ۱۰ لایه با قطرهای مختلف حفره‌ها [۵].



شکل ۵. نمایه ضریب شکست موثر شکل ۴ و تاثیر قطر حفره‌های هوایی [۵].

در شکل ۶ نیز تاثیر قطر حفره‌های هوایی بر منحنی پاشیدگی و مقدار شیب پاشیدگی به همراه مساحت مود موثر نشان داده شده است [۵].



شکل ۶. منحنی پاشیدگی و مساحت مود موثر مربوط به شکل ۴ و تاثیر قطر حفره‌های هوایی [۵].

ارائه ساختار پیشنهادی

برای بهبود تولید طیف ابرپیوستار ابتدا فیبری تک مود طراحی می‌شود که طول موج پاشیدگی آن در محدوده کاربرد در نظر گرفته شده است. با افزایش قطر حفره‌های هوایی، حجم پرتشدگی هوا افزایش یافته و ضریب شکست کاهش می‌یابد که باعث می‌شود، مساحت مود موثر و تلفات تحدید کاهش یافته ولی مقدار پاشیدگی افزایش یابد، از طرفی با ثابت گرفتن ثابت شبکه، نسبت

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A + \sum_{m=1}^4 i^{(m-1)} \frac{\beta_m}{n!} \frac{\partial^m A}{\partial t^m} = \quad (7)$$

$$i\gamma \left(|A|^2 \cdot A + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} |A|^2 \cdot A - T_R A \frac{\partial}{\partial t} |A|^2 \right)$$

در این رابطه و در سمت چپ، پوش پالس ورودی، α ضریب تلفات، β_m ضریب پاشیدگی مراتب بالاتر است که ضرایب خطی معادله‌اند و در سمت راست، عبارت غیرخطی شامل مدولاسیون خودفازی، اثر خودتیزی، ضریب پاشیدگی رامان T_R و فرکانس زاویه‌ای مرکزی پالس ω است [۱]. در ناحیه پاشیدگی غیرعادی اثرات غیرخطی باعث چرپ القایی مثبت شده و با خنثی شدن آن توسط پاشیدگی سرعت گروه^{۱۲}، سالیتون پایه تشکیل شده و بدون هیچ گونه تغییر شکلی در حوزه زمان و فرکانس، در مسافت طولانی منتشر می‌شود. مطابق رابطه ۸، طول پاشیدگی L_D ، اندازه‌ای از طول فیبر است که در آن پهنای زمانی پالس دو برابر شده و طول غیرخطی L_{NL} نیز طبق رابطه ۹ اندازه‌ای از طول فیبر است که در آن پهنای طیفی دو برابر شده است. T_0 پهنای پالس ورودی و P_0 بیشینه توان آن است [۱].

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (8)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0} \quad (9)$$

$$N^2 = \frac{L_D}{L_{NL}} \quad (10)$$

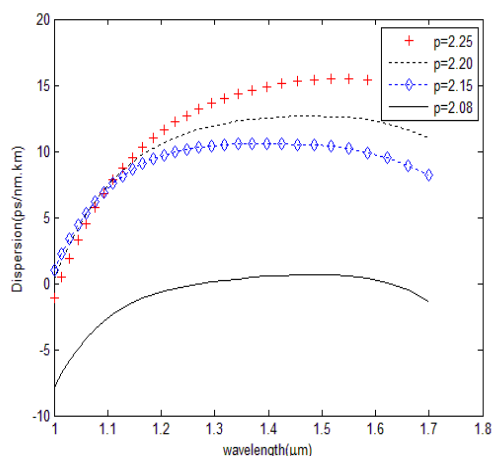
N^2 در رابطه ۱۰ مرتبه سالیتون است. در سالیتون پایه طول پاشیدگی و طول غیرخطی با هم برابر است. با افزایش توان ورودی، واپاشی سالیتون‌ها اتفاق می‌افتد و هارمونیک‌های جدید تولید می‌شود. استفاده از پالس‌های باریک، باعث افزایش توان شده و در پالس‌های کمتر از ۱۰۰ فمتوثانیه، اثر پراکندگی رامان القایی و اثر خودتیزی افزایش می‌یابد در حالی که مراتب بالای پاشیدگی اثرات مخربی بر پالس نوری دارند، بنابراین کاهش ضرایب مرتبه بالای پاشیدگی اهمیت بسیاری دارد.

طول موج پمپ، طول فیبر و همچنین بیشینه توان و عرض زمانی T_0 پالس لیزر ورودی باید به گونه‌ای انتخاب شود تا در حالیکه طول فیبر، از طول غیرخطی بلندتر است، از طول پاشیدگی، خیلی کوتاه‌تر باشد [۹].

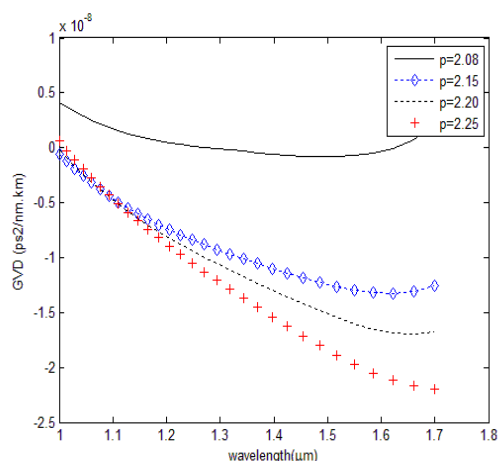
استفاده از پوشش حفره‌های متناوب هوایی با قطرهای مختلف باعث کنترل پاشیدگی و شیب پاشیدگی در محدوده وسیع طول موج می‌شود که در شکل ۴ نمایه سطح مقطع یک فیبر بلور فوتونی ۱۰ لایه با قطرهای مختلفی از حفره‌های هوایی و در شکل ۵، نمایه ضریب شکست موثر آن دیده می‌شود [۵].

11 Chirp
12 Group Velocity Dispersion(GVD)

است. منحنی مطلوب در همه نمودارها با رنگ مشکی پیوسته مشخص و متمایز شده است.



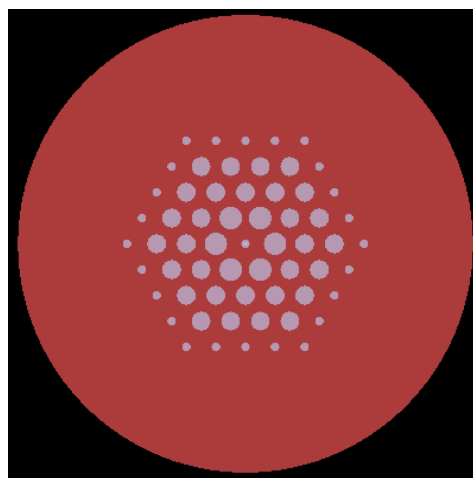
شکل ۸. نقش ثابت شبکه $\Lambda=2/0.8$ ، $\Lambda=2/1.5$ ، $\Lambda=2/2.0$ و $\Lambda=2/2.5$ بر منحنی پاشیدگی با قطر حفره‌های ثابت $d_1=1/5.8$ ، $d_2=1/3.2$ ، $d_3=1/6$ و $d_4=0/6$ میکرومتر



شکل ۹. نقش ثابت شبکه $\Lambda=2/0.8$ ، $\Lambda=2/1.5$ و $\Lambda=2/2.0$ بر منحنی پاشیدگی سرعت گروه، با قطر حفره‌های ثابت $d_1=1/5.8$ ، $d_2=1/3.2$ ، $d_3=1/6$ و $d_4=0/6$ میکرومتر

در شکل ۹ نیز با همین مقادیر، پاشیدگی سرعت گروه بررسی و مشخص می‌شود که حالت بهینه با ثابت شبکه $2/0.8$ میکرومتر امکان پذیر است که مقدار پاشیدگی سرعت گروه نیز صفر است. در گام بعدی طبق شکل ۱۰ و ۱۱ با ثابت گرفتن $\Lambda=2/0.8$ میکرومتر، تاثیر تغییرات قطر حفره‌های حلقه اول بر مقدار پاشیدگی و پاشیدگی سرعت گروه، ترسیم شده است.

d/Λ افزایش یافته و فیبر از حالت تک مود خارج و باعث تقسیم انرژی بین مدهای مختلف و کاهش اثرات غیر خطی می‌شود ضمن اینکه طول موج صفر پاشیدگی هم به محدوده مرئی نزدیک خواهد شد. با توجه به این تضادها، طراحی فیبری تک مود با طول موج صفر پاشیدگی نزدیک به محدوده مخابراتی، با مقدار کم پاشیدگی و شیب تخت، نیازمند مصالحه دقیق بین پارامترهاست. با استفاده از روش خنثی سازی پاشیدگی ماده توسط پاشیدگی موجبر و ایجاد حفره مرکزی، مساحت مود موثر کم شده و با افزایش ضریب غیرخطی، پاشیدگی تخت نزدیک صفر طراحی می‌شود [۱۰]. ساختار طراحی شده، مطابق شکل ۷، یک فیبر بلور فوتونی شش وجهی سیلیکا با ۴ حلقه از حفره هوایی نابرابر است که با ثابت شبکه $2/0.8$ میکرومتر و قطر حفره‌ها بر حسب میکرومتر به ترتیب از حفره مرکزی $d_c=0/6$ ، $d_1=1/5.8$ ، $d_2=1/3.2$ ، $d_3=1/3.2$ ، $d_4=0/6$ نقطه کار بهینه حاصل شده است. پاشیدگی سرعت گروه تابعی از طول موج است و با رسم چند منحنی تاثیر قطر حفره و ثابت شبکه مشخص می‌شود که با مقادیر بالا، همه پارامترها در وضعیت بهینه قرار داشته ولی تلفات تحدید افزایش یافته است که با توجه به کوچکی طول فیبر در محدوده سانتی متر، از آن صرف نظر می‌شود.



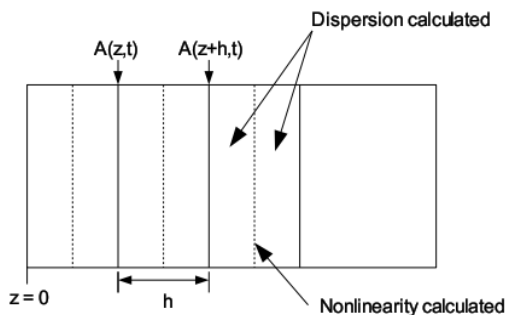
شکل ۷. نمایه فیبر بلور فوتونی طراحی شده با ثابت شبکه $2/0.8$ میکرومتر و قطر حفره مرکزی $d_c=0/6$ و قطر حفره‌ها به ترتیب $d_1=1/5.8$ ، $d_2=1/3.2$ ، $d_3=1/3.2$ و $d_4=0/6$ میکرومتر است.

طبق شکل ۸ با افزایش ثابت شبکه از مقدار $\Lambda=2/0.8$ میکرومتر و ثابت نگه داشتن قطر حفره‌ها با ابعاد ثابت $d_1=1/5.8$ ، $d_2=1/3.2$ ، $d_3=1/3.2$ ، $d_4=0/6$ میکرومتر، منحنی به سمت مقادیر بیشتر پاشیدگی می‌رود و اگر از $2/0.8$ میکرومتر کمتر شود، فیبر از حالت تک مود خارج خواهد شد. در این مقاله، برای راهنمای شکل‌های مربوط به منحنی پارامتر ثابت شبکه Λ از حرف p استفاده شده

جدول ۱. مقایسه ضرایب بهبودیافته مراتب بالای پاشیدگی

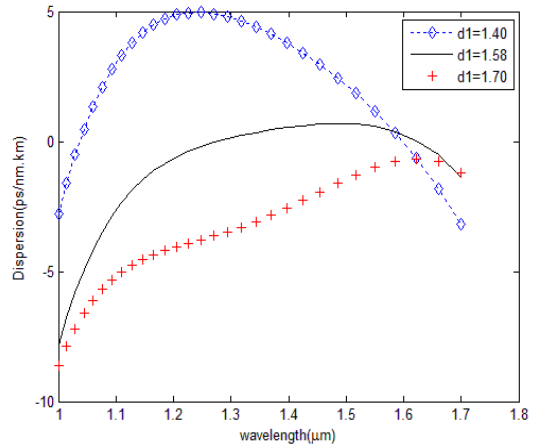
مقاله	[۱۲]	[۱۱]	پارامتر
۱/۲۹	۱/۳۱	۰/۸۳۵	طول موج پاشیدگی صفر (μm)
$-۹/۶ \times 10^{-۱۱}$	-۱۰×10^{-۹}	$-۱۱/۸۳ \times 10^{-۶}$	پاشیدگی سرعت گروه (Ps ² /nm.km)
$۴/۴ \times 10^{-۱۲}$	۴×10^{-۱۲}	$۸/۱ \times 10^{-۸}$	ضریب پاشیدگی مرتبه ۳ (Ps ³ /nm.km)
$۳/۵ \times 10^{-۱۵}$	$۶/۴ \times 10^{-۱۳}$	$-۹/۵ \times 10^{-۱۱}$	ضریب پاشیدگی مرتبه ۴ (Ps ⁴ /nm.km)
$۷/۹ \times 10^{-۱۷}$	$-۳/۰۴ \times 10^{-۱۵}$	۲×10^{-۱۳}	ضریب پاشیدگی مرتبه ۵ (Ps ⁵ /nm.km)

با توجه به اینکه بیشترین بهره پراکندگی القایی رامان در اعمال پهنای پالس ورودی ۲۸ فمتوثانیه است طیف ابرپیوستار، مطابق پارامترهای جدول ۲ شبیه سازی شده است. برای حل عددی معادله شرودینگر غیر خطی با روش فوریه تفکیک گام، معادله غیرخطی به دو قسمت خطی (تلفات و پاشیدگی) و غیرخطی (مدولاسیون فاز، اثر خودتیزی و اثر رامان) تقسیم می شود. در حین انتشار پالس در طول فیبر، آثار خطی و غیرخطی همزمان بر روی پالس تاثیر می گذارند ولی با روش فوریه تفکیک گام، طبق شکل ۱۲ فرض می شود که در فواصل خیلی کوتاه h ، آثار خطی و غیرخطی می توانند به طور مستقیم عمل کنند. یعنی انتشار از z تا $h+z$ در دو گام صورت می گیرد. در گام اول آثار خطی به تنهایی عمل می کنند و در گام دوم آثار غیر خطی بدون در نظر گرفتن آثار خطی تحلیل می شوند [۱].

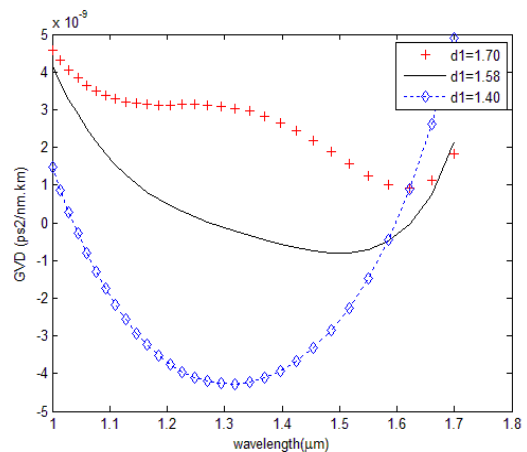


شکل ۱۲. نحوه تاثیر گام به گام اثرات خطی و غیرخطی با روش تفکیک گام فوریه [۱].

با تغییر توان بیشینه ورودی و طول فیبر، پهنای طیف خروجی ابرپیوستار هم تغییر خواهد کرد در این ساختار طراحی شده، هدف تولید طیف مورد نیاز سیستم های مولتی پلکس تقسیم طول موج در محدوده ۱/۴ میکرومتر تا ۱/۶ میکرومتر است که با توجه به شکل های ۱۳ و ۱۴ مشاهده می شود با توان بیشینه ۵ کیلو وات و پهنای پالس ۲۸ فمتوثانیه ای در طول فیبر ۰/۱۵ متری این هدف تحقق یافته است.



شکل ۱۰. نقش تغییر قطر حفره های ردیف اول بر منحنی پاشیدگی، با ثابت نگه داشتن بقیه مقادیر با قطر حفره های ثابت $d_c=۰/۶$ ، $d_4=۰/۶$ ، $d_3=۱/۳۲$ ، $d_2=۱/۳۲$ میکرومتر ثابت شبکه $\Lambda=۲/۰۸$ میکرومتر



شکل ۱۱. نقش تغییر قطر حفره های ردیف اول بر منحنی پاشیدگی سرعت گروه با ثابت نگه داشتن بقیه مقادیر با قطر حفره ثابت $d_3=۱/۳۲$ ، $d_2=۱/۳۲$ ، $d_1=۱/۵۸$ میکرومتر $\Lambda=۲/۰۸$ میکرومتر $d_c=۰/۶$ ، $d_4=۰/۶$

بهترین حالت پاشیدگی تخت و کمینه، بازای قطر حفره های $d_1=۱/۵۸$ ، $d_2=۱/۳۲$ ، $d_3=۱/۳۲$ ، $d_4=۰/۶$ ، $d_c=۰/۶$ میکرومتر بدست می آید. مشاهده می شود که بهترین حالت مربوط به $\Lambda=۲/۰۸$ میکرومتر است که بیشینه پاشیدگی (ps/nm.km) ۰/۷ و مقدار پاشیدگی سرعت گروه صفر به همراه پاشیدگی تخت در محدوده وسیع طول موج مخابراتی ۱/۲ تا ۱/۶ میکرومتر با مساحت مود موثر ۵/۹ میکرومتر مربع و طبق رابطه ۱، ضریب غیرخطی $(W^{-1}.m^{-1})$ ۰/۱۹ حاصل شده است. مراتب بالای پاشیدگی نیز در جدول ۱ ذکر شده و بهبود حاصل شده ضرایب پاشیدگی رابطه ۳ با دو مقاله مرجع دیگر قابل مقایسه است.

نتیجه گیری

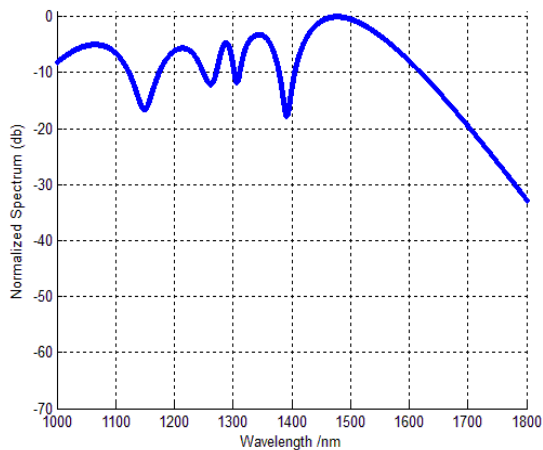
مهم ترین شاخص در طراحی فیبر، جهت تولید طیف ابرپیوستار، انتشار تک مود در محدوده وسیع پاشیدگی صاف و ناحیه غیرعادی با کاهش مساحت مود موثر است. در این مقاله با استفاده از روش خنثی سازی پاشیدگی ماده توسط پاشیدگی موجبر و طراحی ثابت شبکه $2/0.8$ میکرومتر و ایجاد حفره هوایی در مرکز هسته و ۴ ردیف حلقه با قطر حفره‌های نابرابر، ضمن کاهش مساحت مود موثر تا حد $5/9$ میکرومتر مربع، پاشیدگی مراتب بالا به شدت کاهش یافته و پاشیدگی تخت در محدوده $1/2$ میکرومتر تا $1/6$ میکرومتر حاصل و طیف خروجی ابرپیوستار در محدوده طول موج $1/4$ میکرومتر تا $1/62$ میکرومتر با پهنای پالس ۲۸ فمتوثانیه‌ای و توان ۵ کیلو وات شبیه سازی شده است.

مرجع ها

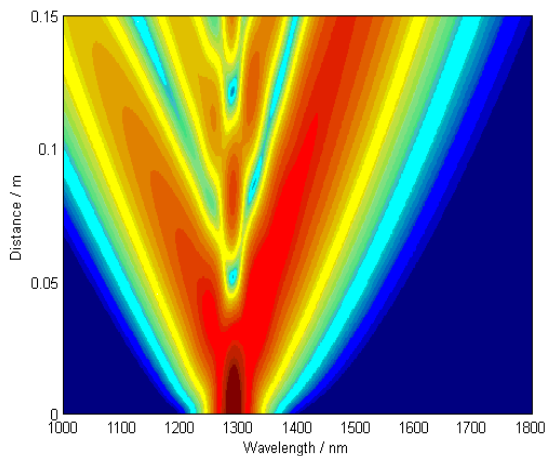
[1] Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", third Edition, ACADEMIC PRESS, 2001.
 [2] J.C. Knight, "Photonic crystal fibers", Nature, 2002, Vol.16, pp. 233-237
 [3] K. Saitoh, et al., "Chromatic dispersion control in Photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion", Optics Express, 2003, Vol.11, pp. 843-852
 [4] P. Russell, "photonic crystal fibers", Science, 2003, Vol.299, pp.358
 [5] K. Saitoh, M. Koshiba, "Numerical Modeling of Photonic Crystal Fibers", Journal of Lightwave Technology, 2005, Vol.23, No.11
 [6] B.T. Kuhlmeier, R.C. McPhedran, C.M. de Sterke, Opt. Lett., 2002, Vol. 27, pp.1684
 [7] K.P. Hansen, Introduction to nonlinear Photonic Crystal Fibers. Opt. Fiber Commun. Rep., 2005 Vol.2, No.3, pp.226-254
 [8] C. Travers, M.H. Frosz, J.M. Dudley, "Nonlinear fiber optics overview in Supercontinuum Generation in Optical Fibers, ch.3, Cambridge University Press, 2010.
 [9] فرشید کوهی کمالی، حامد سقایی، مجید ابن علی حیدری، محمد کاظم مروج فرشی. "تولید طیف ابرپیوستار در محدوده نور مرئی با استفاده از فیبر بلور فوتونی لانه زنبوری" بیستمین کنفرانس مهندسی برق ایران، ۱۳۹۱
 [10] K. Saitoh, N. Florous, M. Koshiba, Ultra-flattened chromatic dispersion controllability using a defected-core Photonic Crystal Fiber with low confinement losses", Optics Express, 2005 Vol.13, No.21, pp. 365
 [11] J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen. "Super continuum generation in Photonic Crystal Fiber". Reviews of Modern Physics, 2006, Vol.78, pp. 1135
 [12] J.M. Dudley, G. Genty, S. Coen. "Super continuum generation in Photonic Crystal Fiber". Reviews of Modern Physics, 2006, Vol.78, pp. 1135

جدول ۲. مقادیر شبیه سازی طیف ابرپیوستار در ساختار طراحی شده

مقدار	پارامتر بر حسب واحد
۵	توان ماکزیم پالس (kw)
۱/۲۹	طول موج پمپ (μm)
۱/۲۹	طول موج پاشیدگی صفر (μm)
۲۸	پهنای پالس (fs)
۱۹	ضریب غیر خطی ($\text{w}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
۰/۱۵	طول فیبر (m)
$-9/6 \times 10^{-11}$	پاشیدگی سرعت گروه ($\text{Ps}^2/\text{nm} \cdot \text{km}$)
$4/4 \times 10^{-12}$	ضریب پاشیدگی مرتبه ۳ ($\text{Ps}^3/\text{nm} \cdot \text{km}$)
$3/5 \times 10^{-15}$	ضریب پاشیدگی مرتبه ۴ ($\text{Ps}^4/\text{nm} \cdot \text{km}$)
$7/9 \times 10^{-17}$	ضریب پاشیدگی مرتبه ۵ ($\text{Ps}^5/\text{nm} \cdot \text{km}$)
۰/۱۵	تلفات (dB/m)



شکل ۱۳. شبیه سازی طیف ابرپیوستار ساختار طراحی شده مطابق جدول ۲



شکل ۱۴. شبیه سازی طیف ابرپیوستار و تاثیر طول فیبر ساختار طراحی شده مطابق جدول ۲