

فیبر بلور فوتونی جبران ساز پاشندگی شبکه مربعی

عصمت جعفری^۱، محمدعلی منصوری بیرجندی^۲

^۱ کارشناسی ارشد برق- الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، mansouri@ece.usb.ac.ir

چکیده

در این مقاله یک ساختار جدید برای فیبرهای بلور فوتونی جبران ساز پاشندگی رنگی به منظور پهن کردن مشخصه پاشندگی رنگی و افزایش قابلیت جبران پاشندگی در محدوده وسیعی از طول موج ارائه می شود. در این نمونه پیشنهادی، با قرار دادن ساختار ستاره‌ای به جای حلقه اول پوشش داخلی فیبر شبکه مربعی، پهنای باند مربوط به مشخصه پاشندگی پهن تر شده است و فیبر توانایی جبران پاشندگی سرتاسر باندهای مخابراتی E تا U را خواهد داشت. با این فیبر در طول موج $1/55$ میکرومتر ضریب پاشندگی رنگی $553 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ - و کمینه ضریب پاشندگی رنگی $1205 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ - در طول موج $1/71$ میکرومتر به دست می آید. شبیه سازی این فیبر با روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان انجام می شود.

کلیدواژه

فیبر بلور فوتونی، جبران پاشندگی، پاشندگی منفی

مقدمه

به هر ساختاری که در آن ضریب شکست به صورت متناوب تغییر کند بلور فوتونی گفته می شود. برای اولین بار، ایده بلور فوتونی در سال ۱۹۸۷ در دو مقاله مستقل توسط جان [۱] و بابلونویچ [۲] به طور جداگانه بررسی و اثبات شد. بلورهای فوتونی کاربردهای زیادی دارند از جمله در ساخت فیبرهای نوری [۳]، فیلترها [۴] و غیره.

در فیبرهای نوری پاشندگی یکی از مهم ترین ویژگی های فیبر است خصوصاً در انتقال در مسافت های طولانی پاشندگی باعث پهن شدن بیش از حد پالس و از بین رفتن اطلاعات می شود و لازم است از فیبر جبران ساز پاشندگی^۱ در مسیر انتقال استفاده کنیم. یک فیبر جبران ساز پاشندگی که دارای مقدار پاشندگی منفی است پالسی را که پهن شده دوباره فشرده می کند. استفاده از فیبرهای بلور فوتونی دو هسته هم مرکز در جبران پاشندگی، امکان دستیابی به پاشندگی منفی بزرگ تر و تلفات کمتر را فراهم می کند [۵-۶]. تزویج مدهای هدایتی هسته های داخلی و خارجی در فیبرهای بلور فوتونی جبران ساز پاشندگی باعث ایجاد مشخصه پاشندگی مقعر با ضریب پاشندگی منفی بزرگ می شود. به دلیل مشخصه پاشندگی مقعر فیبرهای دو هسته هم مرکز، پهنای باند طول موج در دسترس برای جبران

پاشندگی فیبر خیلی باریک است. بنابراین، برای کاربردهای باند وسیع لازم است شیب پاشندگی نیز به خوبی جبران شود.

تاکنون ساختارهای زیادی برای فیبرهای بلور فوتونی جبران ساز پاشندگی ارائه شده است. برای مثال ساختاری که توسط زیگری^۲ و همکارانش ارائه شده دارای ضریب پاشندگی $600 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ - است و تنها قابلیت جبران پاشندگی در باند C را دارد [۷] همچنین این فیبر دارای هسته ناخالص است که باعث پیچیدگی در فرآیند ساخت می شود. فیبر جبران ساز پاشندگی لانه زنبوری قابلیت جبران پاشندگی در باند وسیع را دارد [۸] اما هسته داخلی این فیبر با ژرمانیم ناخالص شده است که باعث پیچیدگی در فرآیند ساخت می شود. فیبر جبران ساز پاشندگی باند وسیعی که توسط احتشامی و همکارش ارائه شد [۹] دارای ضریب پاشندگی $193/2 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ - در طول موج $1/55$ میکرومتر است و قابلیت جبران پاشندگی در محدوده $1/35$ تا $1/65$ میکرومتر را دارد. همچنین ساختاری که توسط سیدیکو^۳ و همکارانش ارائه شد [۱۰] دارای ضریب پاشندگی $897 \text{ ps}/(\text{nm.km})$ - در طول موج $1/55$ میکرومتر است و قابلیت جبران پاشندگی در محدوده $1/34$ تا $1/64$ میکرومتر را دارد.

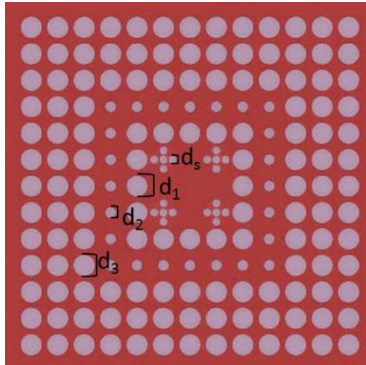
در این مقاله، یک فیبر بلور فوتونی جبران ساز پاشندگی شبکه مربعی ارائه می شود که با قرار دادن ساختار ستاره ای در پوشش

^۲ B. Zsigri

^۳ A. H. Siddique

^۱ Dispersion Compensating Fiber (DCF)

است. ماده زمینه نیز سیلیکا خالص است. کمیت‌های بهینه این ساختار در جدول ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. فیبر جبرانساز پاشندگی شبکه مربعی پیشنهادی

جدول ۱. مقادیر کمیت‌های ساختار پیشنهادی

مقدار (μm)	نماد	کمیت
۱/۰۰	Λ	ثابت شبکه مربعی
۰/۳۵	Λ_s	ثابت شبکه ساختار ستاره‌ای
۰/۳۰	d_s	قطر حفره‌های ساختار ستاره‌ای
۰/۷۸	d_1	قطر حفره‌های پوشش داخلی
۰/۴۰	d_2	قطر حفره‌های هسته خارجی
۰/۸۰	d_3	قطر حفره‌های پوشش خارجی

شبیه‌سازی کلیه ساختارهای این مقاله با استفاده از نرم افزار لومریکال انجام شده است. در این نرم‌افزار از روش محاسباتی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) استفاده شده. این روش از الگوریتم بی برای دستیابی به هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی از طریق حل مستقیم معادلات ماکسول با این فرض که محیط خاصیت مغناطیسی ندارد استفاده می‌کند.

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (۳)$$

$$\mathbf{D}(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_r(\omega) \mathbf{E}(\omega) \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} \quad (۵)$$

به طوری که E میدان الکتریکی، H میدان مغناطیسی، D چگالی شار الکتریکی، ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، ϵ_r گذردهی الکتریکی نسبی محیط و μ_0 ضریب گذردهی مغناطیسی خلأ است. ماده زمینه نیز با استفاده از معادله سلمیر^۶ توصیف شده است. معادله سلمیر معادله‌ای است که رابطه بین ضریب شکست ماده را با طول موج نور بیان می‌کند. ضرایب معادله سلمیر به صورت تجربی به دست می‌آیند [۱۲].

داخلی فیبر، مشخصه پاشندگی فیبر پهن تر می‌شود و فیبر توانایی جبران پاشندگی سرتاسر باندهای مخابراتی E تا U را خواهد داشت که نسبت به ساختارهای مشابه ذکر شده محدوده طول موج وسیع تری را شامل می‌شود.

تئوری و معرفی ساختار پیشنهادی

یکی از انواع پاشندگی در فیبر، پاشندگی رنگی است و به دلیل اینکه مولفه‌های مختلف طول موج یک پالس نور با سرعت‌های متفاوتی درون فیبر حرکت می‌کنند به وجود می‌آید. پاشندگی رنگی مهم‌ترین عامل پاشندگی در فیبرهای تک مد است. و با معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$D_c = \frac{1}{L} \frac{\Delta t_c}{\Delta \lambda} = -\frac{\lambda}{C} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (۱)$$

در این معادله D_c ضریب پاشندگی رنگی، Δt_c پاشندگی رنگی، L طول فیبر، $\Delta \lambda$ پهنای طیف، λ طول موج در خلأ، C سرعت نور در خلأ و n_{eff} ضریب شکست موثر فیبر است [۱۱].

در جبران پاشندگی تک کانال^۴، تنها مقدار پاشندگی فیبر در طول موج مورد نظر مهم است اما به دلیل وابستگی پاشندگی به طول موج، برای جبران پاشندگی چند کانال به طور همزمان، شیب پاشندگی (S) نیز نقش مهمی در جبران پاشندگی دارد. کمیت شیب پاشندگی نسبی^۵ (RDS) به صورت نسبت شیب پاشندگی به ضریب پاشندگی تعریف می‌شود.

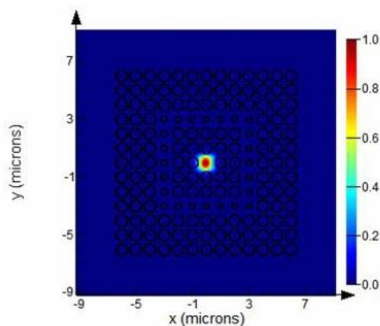
$$RDS = \frac{S(\lambda)}{D(\lambda)} \quad (۲)$$

ساختار ارایه شده در این مقاله که در شکل ۱ مشاهده می‌شود یک فیبر بلور فوتونی دارای شبکه مربعی با حفره‌های دایره‌ای است. این فیبر دارای دو حلقه پوشش داخلی و سه حلقه پوشش خارجی است که به جای حلقه اول پوشش داخلی از یک ساختار ستاره‌ای استفاده می‌شود. در فیبرهای جبرانساز پاشندگی، مشخصه پاشندگی فیبر به پارامترهایی مثل هندسه حفره‌ها، ثابت شبکه و اندازه حفره‌ها وابسته است که حفره‌های نزدیک به هسته (حفره‌های پوشش داخلی) تاثیر زیادی روی مشخصه پاشندگی فیبر دارند. بنابراین از یک ساختار ستاره‌ای در حلقه اول پوشش داخلی فیبر استفاده می‌شود. هسته خارجی با کاهش قطر حفره‌های هوا حلقه سوم ایجاد شده

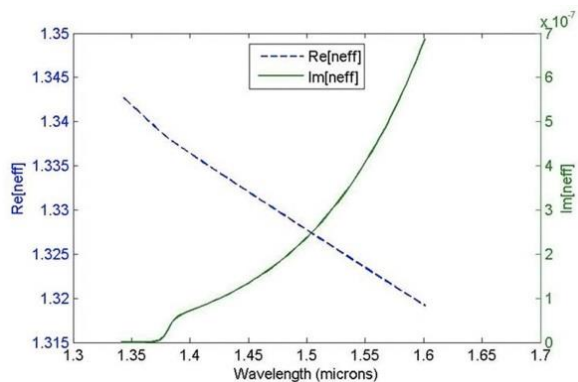
^۶ Sellmeier

^۴ single-channel
^۵ Relative dispersion slope

هسته حبس شده است. شکل ۴ بخش حقیقی و موهومی ضریب شکست موثر فیبر ساده را برحسب طول موج برای مد اصلی نشان می‌دهد.

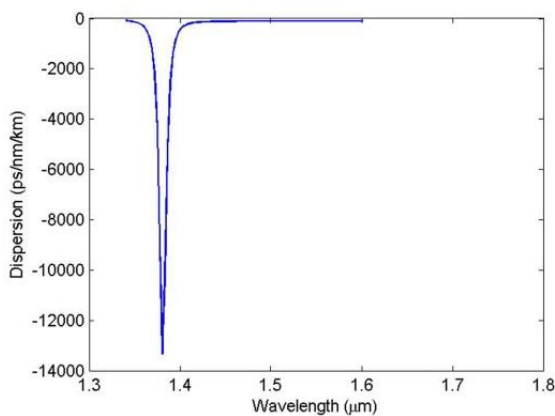


شکل ۳. توزیع میدان مد اصلی فیبر ساده در طول موج ۱/۵۵μm



شکل ۴. منحنی ضریب شکست موثر فیبر شبکه مربعی ساده برحسب طول موج

مشخصه پاشندگی فیبر جبران‌ساز پاشندگی شبکه مربعی ساده، همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بسیار باریک است و تنها در محدوده باریکی حول طول موج ۱/۳۸ میکرومتر دارای ضریب پاشندگی منفی است. این فیبر فقط در همین محدوده طول موج می‌تواند به‌عنوان فیبر جبران‌ساز پاشندگی استفاده شود و در طول موج‌های خارج از این محدوده قابلیت جبران پاشندگی را ندارد.



شکل ۵. مشخصه پاشندگی فیبر جبران‌ساز پاشندگی شبکه مربعی ساده

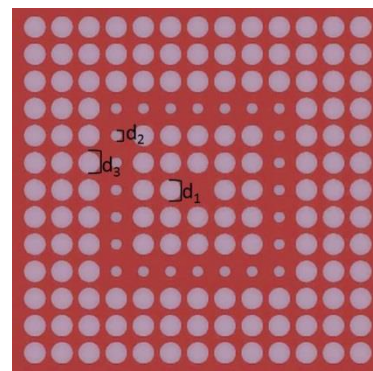
$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} + \dots \quad (6)$$

که $A_1, A_2, A_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ضرایب سلمیر نامیده می‌شوند و به صورت تجربی بدست می‌آیند.

معمولاً برای ساخت فیبرهای بلور فوتونی ابتدا یک پیش‌سازه با مقیاس بزرگتر طراحی می‌شود و در نهایت با کشش در برج کشش^۷ در دمای بالا، به اندازه‌های میکرونی می‌رسند.

شبیه‌سازی و نتایج

برای اینکه تاثیر ساختار پیشنهادی روی پهن کردن مشخصه پاشندگی رنگی به‌خوبی قابل مشاهده باشد، ابتدا یک فیبر شبکه مربعی با پوشش ساده و دقیقاً با همان کمیت‌های ساختار پیشنهادی را شبیه‌سازی کرده و مشخصه پاشندگی رنگی آن محاسبه می‌شود. سپس در همان ساختار، حلقه اول پوشش هسته داخلی را برداشته و به‌جای آن ساختار ستاره‌ای پیشنهادی قرار داده می‌شود تا تاثیر این ساختار روی مشخصه پاشندگی فیبر مشاهده شود. شکل ۲ ساختار فیبر جبران‌ساز پاشندگی شبکه مربعی ساده را نشان می‌دهد. کمیت‌های این فیبر در جدول ۲ آمده است.



شکل ۲. فیبر جبران‌ساز پاشندگی شبکه مربعی ساده

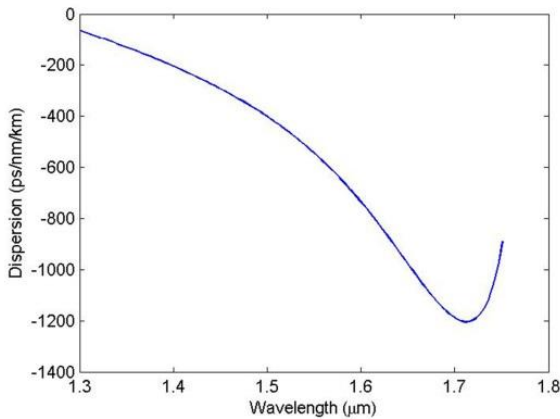
جدول ۲. مقادیر کمیت‌های فیبر جبران‌ساز پاشندگی شبکه مربعی ساده

مقدار (μm)	نماد	کمیت
۱/۰۰	Λ	ثابت شبکه مربعی
۰/۷۸	d ₁	قطر حفره‌های پوشش داخلی
۰/۴۰	d ₂	قطر حفره‌های هسته خارجی
۰/۸۰	d ₃	قطر حفره‌های پوشش خارجی

شکل ۳ توزیع میدان مد اصلی فیبر ساده را نشان می‌دهد همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است مد اصلی به‌خوبی در

^۷ Drawing tower

ساختاری که توسط زیگری و همکارانش [۷] نیز ارائه شد تنها قابلیت جبران پاشندگی در باند C را دارد. ساختار پیشنهادی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر دارای ضریب پاشندگی $(-۵۵۳ \text{ps}/(\text{nm.km}))$ و کمینه ضریب پاشندگی $(-۱۲۰۵ \text{ps}/(\text{nm.km}))$ در طول موج ۱/۷۱ میکرومتر است. مقایسه ساختار ارائه شده با برخی ساختارهای مشابه به طور مختصر در جدول ۳ نشان داده شده که ضریب پاشندگی و شیب پاشندگی نسبی برای طول موج ۱/۵۵ میکرومتر بیان شده است.



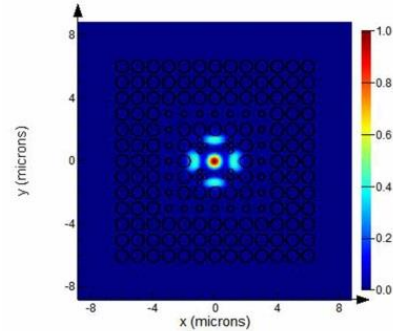
شکل ۸. مشخصه پاشندگی فیبر جبرانساز پاشندگی شبکه مربعی پیشنهادی

جدول ۳. مقایسه مشخصه های پاشندگی فیبر طراحی شده با کارهای مشابه

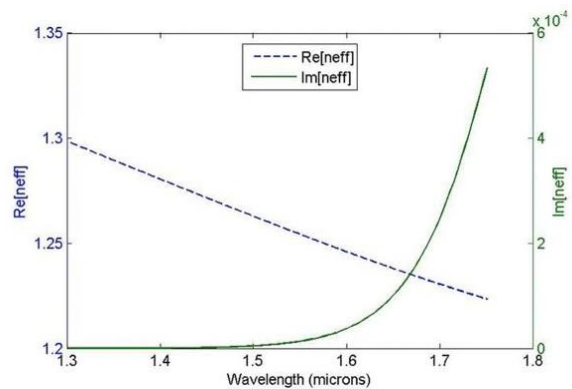
فیبر پیشنهادی	[۱۰]	[۹]	[۷]	کمیت
				D (ps/(nm.km))
-۵۵۳	-۸۹۷	-۱۲۸/۲	-۶۰۰	
۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۳۵	RDS (nm ⁻¹)
U تا E	C تا E	L تا E	C	پهنای باند

شکل ۹ تغییر مشخصه پاشندگی را با تغییر قطر حفره های ساختار ستاره ای نشان می دهد. همان طور که در شکل نیز دیده می شود با کاهش قطر حفره های ساختار ستاره ای مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک تر شده و کمینه پاشندگی به طول موج های کوچک تر انتقال می یابد و با افزایش قطر حفره ها ضریب پاشندگی منفی تر شده ولی از طول موج ۱/۵۹ میکرومتر به بعد نوسانات پاشندگی زیاد می شود. در واقع افزایش قطر حفره های نزدیک هسته باعث افزایش نوسانات پاشندگی می شود.

حال مطابق با شکل ۱ به جای حلقه اول پوشش داخلی از ساختار ستاره ای استفاده می کنیم. شکل های ۶ و ۷ به ترتیب توزیع میدان مد اصلی و منحنی ضریب شکست موثر فیبر پیشنهاد شده در شکل ۱ را نشان می دهند.

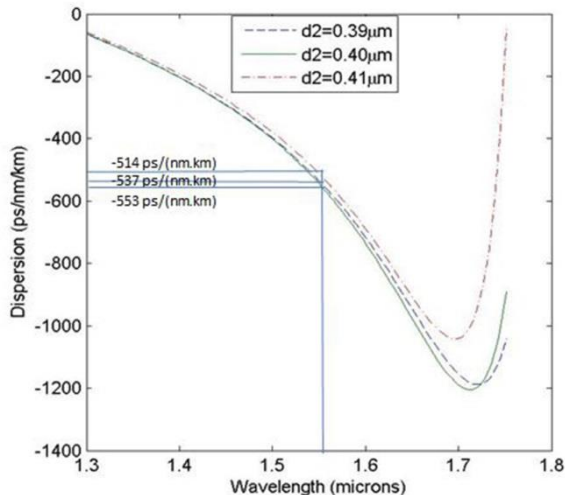


شکل ۶. توزیع میدان مد اصلی فیبر پیشنهادی در طول موج ۱/۵۵ μm



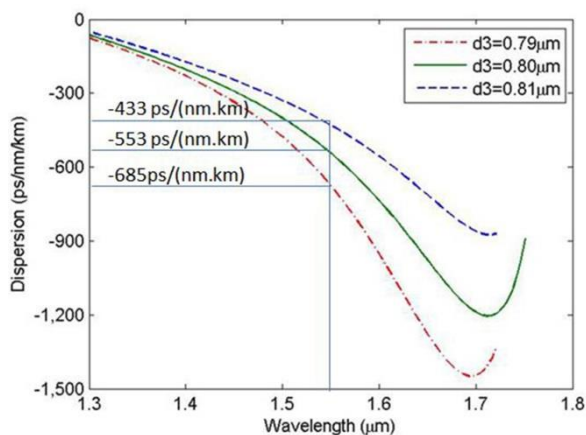
شکل ۷. منحنی ضریب شکست موثر فیبر جبرانساز پاشندگی پیشنهادی

با توجه به شکل ۸ مشاهده می شود که اضافه کردن ساختار ستاره ای به پوشش هسته داخلی باعث شد که این فیبر در محدوده طول موج وسیعی دارای پاشندگی منفی باشد. معمولاً محدوده ای از طول موج برای جبران پاشندگی استفاده می شود که دارای ضریب پاشندگی و شیب پاشندگی منفی باشد. این فیبر در محدوده ۱/۳ تا ۱/۷۱ میکرومتر دارای ضریب پاشندگی و شیب پاشندگی منفی است و قابلیت جبران پاشندگی را دارد. این محدوده طول موج باندهای مخابراتی E تا U (از طول موج ۱/۳۶ تا ۱/۶۷۵ میکرومتر) را به طور کامل در برمی گیرد که نسبت به ساختارهای مشابه ذکر شده محدوده طول موج وسیع تری را شامل می شود. نسبت به ساختار شبکه مربعی ارائه شده توسط سیدیکو و همکارانش [۱۰] (محدوده طول موج ۱/۳۴ تا ۱/۶۴ میکرومتر) محدوده وسیع تری از طول موج را شامل می شود. همچنین نسبت به ساختار شبکه مربعی ارائه شده توسط احتشامی و همکارش [۹] (محدوده طول موج ۱/۳۵ تا ۱/۶۵ میکرومتر) و ضریب پاشندگی $(-۱۹۳/۲ \text{ps}/(\text{nm.km}))$ در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر، هم محدوده وسیع تری از طول موج را شامل می شود و هم ضریب پاشندگی منفی تری دارد.



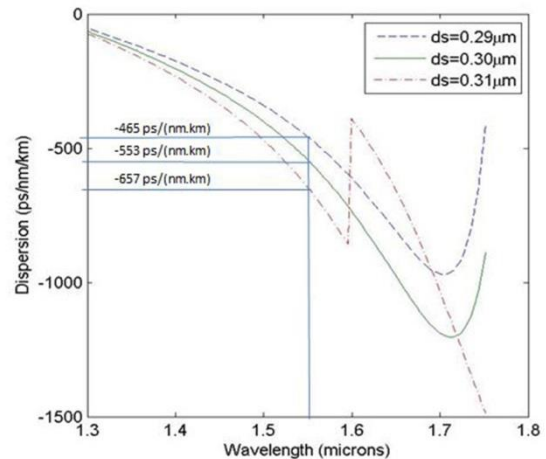
شکل ۱۱. اثر تغییر قطر حفره‌های هسته خارجی روی مشخصه پاشندگی

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود با افزایش قطر حفره‌های پوشش خارجی مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابد و با کاهش قطر حفره‌ها، مشخصه پاشندگی به مقادیر منفی نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های کوچک‌تر انتقال می‌یابد.



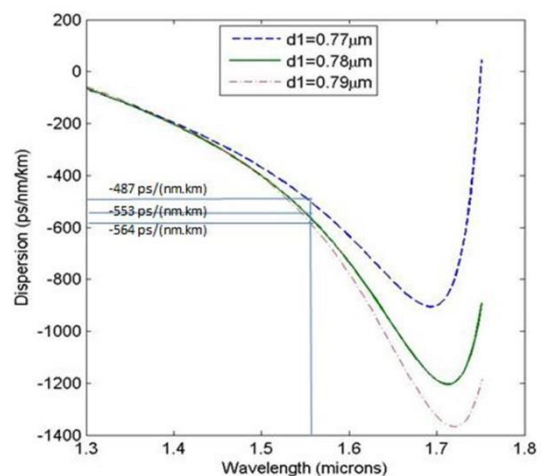
شکل ۱۲. اثر تغییر قطر حفره‌های پوشش خارجی روی مشخصه پاشندگی

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب اثر تغییر ثابت شبکه مربعی و ثابت شبکه ساختار ستاره‌ای را روی مشخصه پاشندگی فیبر نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش ثابت شبکه مربعی مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های کوچک‌تر انتقال می‌یابد و با کاهش ثابت شبکه مربعی مشخصه پاشندگی به مقادیر منفی نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابد. همچنین با کاهش ثابت شبکه ساختار ستاره‌ای مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابد و با افزایش ثابت شبکه



شکل ۹. اثر تغییر قطر حفره‌های ساختار ستاره‌ای روی مشخصه پاشندگی

اثر تغییر قطر حفره‌های حلقه دوم پوشش داخلی روی مشخصه پاشندگی در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. با کاهش قطر حفره‌های پوشش داخلی، مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های کوچک‌تر انتقال می‌یابد و با افزایش قطر حفره‌ها ضریب پاشندگی منفی‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابد.



شکل ۱۰. اثر تغییر قطر حفره‌های حلقه دوم پوشش داخلی روی مشخصه پاشندگی

شکل ۱۱ اثر تغییر قطر حفره‌های هسته خارجی را روی مشخصه پاشندگی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود با افزایش قطر حفره‌های هسته خارجی مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های کوچک‌تر انتقال می‌یابد و با کاهش قطر حفره‌ها، مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده و کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های بزرگ‌تر انتقال می‌یابد.

دارد. با این فیبر در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر ضریب پاشندگی $-۵۵۳ \text{ ps}/(\text{nm.km})$ و کمینه ضریب پاشندگی $-۱۲۰۵ \text{ ps}/(\text{nm.km})$ در طول موج ۱/۷۱ میکرومتر به دست آمد.

مراجع

[1] S. John, "Strong localization of photons in certain dielectric superlattices," Phys. Rev. Lett, 1987, vol. 58, pp. 2486.

[2] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett, 1987, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062.

[۳] محمود صیغوری، رحمان کلهر، "ارائه ساختاری جدید از

فیبر بلور فوتونی به منظور بهبود تولید طیف ابرپیوستار"

فصلنامه صنایع الکترونیک، ۱۳۹۵، دوره ۷ شماره ۱، ص. ۱-۱۰.

[4] Mehdi Toloo, Ameneh Zandim, Ali Emrouznejad, "Evaluation efficiency of large-scale data set with negative data: an artificial neural network approach," Springer, Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2015, Vol. 71, pp. 2397-2411.

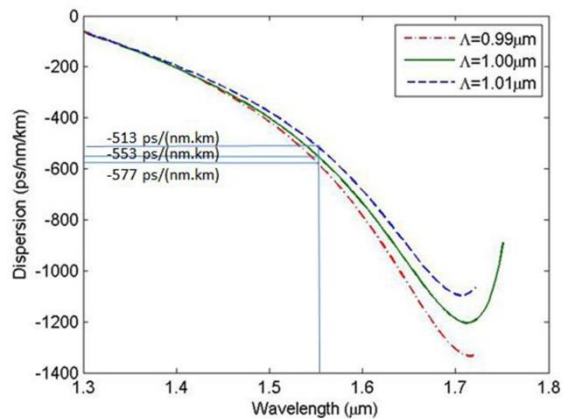
[5] Qiang Xu, Miao Wang, Shebao Lin, Zhihui Yang, Yani Zhang, Lei Zhang, "Theoretical study of novel dual-core microstructured photonic crystal fiber," Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, Vol. 127, Issue 6, pp. 3427-3429.

[6] Jui-Ming Hsu, Bing-Liang Wang, "Tailoring of broadband dispersion-compensating photonic crystal fibre," Journal of Modern Optics, 2016, Vol. 64, pp. 1-12.

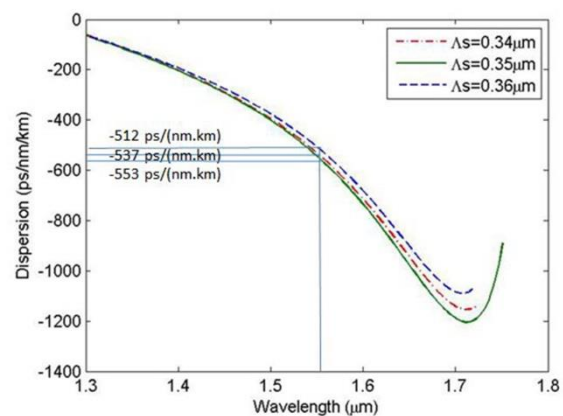
[7] B. Zsigri, J. Lægsgaard and A. Bjarklev, "A novel photonic crystal fibre design for dispersion compensation," J. Opt. A: Pure Appl. Opt, 2004, Vol. 6, pp. 717-720.

[8] S. Yang, Y. Zhang, L. He, and S. Xie, "Broadband dispersion compensating photonic

ساختار ستاره‌ای بازهم مشخصه پاشندگی به مقادیر مثبت نزدیک‌تر شده اما کمینه پاشندگی به طول‌موج‌های کوچک‌تر انتقال می‌یابد.



شکل ۱۳. اثر تغییر ثابت شبکه مربعی روی مشخصه پاشندگی



شکل ۱۴. اثر تغییر ثابت شبکه ساختار ستاره‌ای روی مشخصه پاشندگی

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید برای فیبرهای بلور فوتونی جبرانساز پاشندگی باند وسیع ارائه شد. با شبیه‌سازی این فیبر با استفاده از روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان تأثیر این ساختار بر مشخصه پاشندگی بررسی شد. قرار دادن ساختار ستاره‌ای به جای حلقه اول پوشش داخلی فیبر شبکه مربعی باعث شد پهنای باند مربوط به مشخصه پاشندگی فیبر پهن‌تر شود و فیبر توانایی جبران پاشندگی سرتاسر باندهای مخابراتی E تا U را داشته باشد که نسبت به ساختارهای مشابه ذکر شده محدوده طول‌موج وسیع‌تری را شامل می‌شود. به‌عنوان مثال، نسبت به ساختارهای ارائه شده در [۷ و ۱۰]، محدوده وسیع‌تری از طول‌موج را شامل می‌شود. و همچنین نسبت به ساختار شبکه مربعی ارائه شده در [۹]، هم محدوده وسیع‌تری از طول‌موج را شامل می‌شود و هم ضریب پاشندگی منفی‌تری

Telecom Bands,” IEEE, International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 13-15 Feb. 2014.

[11] R. S. Quimby, “Photonics and Lasers An Introduction,” Wiley, 2006, pp. 69-77.

[12] W.C. Tan, K. Koughia, J. Singh, S.O. Kasap, “Optical Properties of Condensed Matter and Applications,” Wiley, 2006, pp. 7-8.

crystal fiber,” *Opt. Lett*, 2006, Vol. 31, pp. 2830–2832.

[9] N. Ehteshami, V. Sathi, “A novel broadband dispersion compensating square-lattice photonic crystal fiber,” *Opt Quant Electron*, 2012, Vol .44, pp. 323–335.

[10] A. H. Siddique , R. Ahmad, S. Ali, M. A. Islam, K. M. Nasim , E. Khandker, M. Samiul Habib, “Design of a Square Lattice Photonic Crystal Fiber for Dispersion Compensation over

