



بهبود پاشندگی در فیبرهای بلور فوتونی دو هسته‌ای با ساختار شش ضلعی

مهوش خلیلی^{۱*}، آرش کریمخانی^۲

۱- کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه دولتی تفرش

۲- استادیار برق الکترونیک، دانشگاه دولتی تفرش

*mahvashkhalili_716@yahoo.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۱۴۰۰ پذیرش: خرداد ماه ۱۴۰۰

چکیده

این پژوهش با هدف مدیریت پاشندگی در فیبرهای بلور فوتونی دو هسته‌ای ارائه گردیده است. در این گزارش، به معرفی و بازبینی سازی چند ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای پرداخته شده است. در این ساختار، هسته‌ی اول و دوم با حذف یا تغییر قطر سوراخ‌های هوای یک حلقه و یا با تزریق پلیمر با ضریب شکست متفاوت به میله‌های یک حلقه ایجاد می‌شوند. پاشندگی ساختارها با تغییر یک پارامتر و ثابت نگاه داشتن سایر پارامترها مقایسه شده است. مطلوب بدست آوردن ساختاری با بیشترین پاشندگی منفی است تا به عنوان جبران کننده پاشندگی برای ارتباطات نوری با سرعت بالا از آن استفاده شود. علاوه بر این، پاشندگی منفی بیشتر طول فیبر جبران کننده پاشندگی را کوتاه می‌کند. بین ساختارهای بررسی شده مشاهده شده است تغییر در قطر سوراخ‌های حلقه‌های بعد از هسته مرکزی بیشترین تاثیر را روی پاشندگی دارند و با افزایش آن پاشندگی منفی بیشتر می‌شود و بعد از آن تغییر در قطر سوراخ‌های حلقه هسته دوم و بعد از آن تغییر در قطر سوراخ‌های بعد از هسته دوم مرکز است. در واقع برای پاشندگی باید هسته دوم، حلقه‌ی دوم و سوم باشد. در ادامه با تزریق پلیمر با ضریب شکست بالاتر که قابل تغییر با دما است، به سوراخ‌های هسته دوم به پاشندگی منفی رسیده که کل باند C را پوشش داده است. با تزریق مایع هر چه برای انتخاب هسته دوم به حلقه‌های بالاتر برود، طول موج پاشندگی مینیمم به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر می‌رود و با افزایش قطر سوراخ‌ها، مینیمم پاشندگی به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر می‌رود. با بازبینی سازی ساختار شش ضلعی با میله‌های دایره‌ای در مقاله‌ی اخیر به پاشندگی 25000 ps/nm/km رسید. با تنظیم قطر و انتخاب موقعیت حلقه هسته به پاشندگی بهبود یافته 40000 ps/nm/km بدست آمد. در نهایت فیبر بلور فوتونی با میله‌های بیضی طراحی شده است و مشاهده شد که فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با میله‌های بیضی شکل مینیمم پاشندگی دارد اما فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با میله دایره‌ای پاشندگی منفی بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای، طول موج، پاشندگی منفی، جبران کننده پاشندگی.

۱- مقدمه

تاکنون مطالعات انجام شده در زمینه مهندسی پاشندگی در فیبرهای بلور فوتونی، عمدتاً بر روی فیبرهایی که از جنس شیشه سیلیکای خالص هستند متمرکز بوده است. بازه انتقال نور در شیشه سیلیکا در محدوده 350 nm تا حدوداً $2/2 \mu\text{m}$ است و لذا

فقط برای عبور نور در ناحیه نور مرئی (۷۰۰-۳۹۰nm) و IR (۷۰۰-۲۰۰۰nm) مناسب است و سایر طول موج‌های تابش مانند mid-IR (۲۵۰۰-۲۰۰۰nm) که در بازه‌های طول موجی بلندتر هستند را جذب کرده و از خود عبور نمی‌دهد [۱].

بلور فوتونی موجب تحول وسیعی در عرصه قطعات نوری شد. بلورهای فوتونی دسته جدیدی از محیط‌های نوری و مشابه نیمه‌هادی‌ها هستند که می‌توان عبور نور در داخل آن‌ها را تحت کنترل در آورد. بلورهای فوتونی از نظر فیزیکی، ساختار و نحوه تاثیر آن‌ها بر حامل‌های اطلاعات کاملاً مشابه بلورهای الکترونی معمولی هستند با این تفاوت که حامل اطلاعات در آن‌ها به جای الکترون، نور است و از طرفی دیگر، عامل تکرار شونده در بلور بجای پتانسیل اتم‌ها یا مولکول‌ها، ضریب شکست یا دی‌الکتریک مواد تشکیل دهنده بلور فوتونی است که به صورت متناوب تغییر می‌کنند. اگر این تناوب در یک بعد باشد بلور فوتونی یک بعدی است و اگر تناوب در دو یا سه بعد باشد بلور فوتونی به ترتیب بلور فوتونی دو بعدی و سه بعدی نامیده می‌شود [۲،۳].

فیبرهای بلور فوتونی که با نام‌های فیبرهای میکروساختار یا فیبرهای سوراخ‌دار شناخته می‌شوند از فیبرهای اپتیکی نسل جدید و از مهم‌ترین دست‌آوردهای اخیر در فناوری نوری هستند و برای اولین بار در سال ۱۹۹۲ معرفی شدند [۴]. فیبرهای بلور فوتونی براساس ترکیبی از خواص فیبرهای نوری معمولی و بلورهای فوتونی ساخته می‌شوند. به دلیل مزایا و ویژگی‌های منحصر به فرد این دسته از فیبرها شامل پهنای باند زیاد، هدایت تک مدی در بازه وسیع طول موجی، امکان مدیریت پاشندگی و تلفات، تنظیم هدایت نور و... محققین آن‌ها را در کاربردهای متنوعی از جمله فیبر جبران‌کننده پاشندگی پیشنهاد می‌دهند [۵]. پاشندگی باعث گسترش پالس نوری در حوزه زمان می‌شود که باعث ایجاد محدودیت در ارسال اطلاعات در مخابرات نوری است. می‌توان از خواص فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای استفاده کرد و فیبر با پاشندگی منفی بالا طراحی کرد و از آن بعنوان جبران‌کننده پاشندگی استفاده کرد. پس نقطه پیک پاشندگی منفی حائز اهمیت می‌باشد. D پاشندگی بر حسب ps/nm/km ، λ طول موج بر حسب میکرون، C سرعت نور، $Re[n_{eff}(\lambda)]$ بخش حقیقی ضریب شکست موثر نور، β_2 طول موج پاشندگی صفر می‌نامند.

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2}{d\lambda^2} Re[n_{eff}(\lambda)] = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (1)$$

دو مکانیزم هدایت در فیبرهای بلور فوتونی وجود دارد یکی بر اساس هدایت و ضریب شکست موثر که نور بر اساس بازتاب کلی داخلی بین هسته جامد و منطقه روکش با چند سوراخ هوا هدایت می‌شود به عبارت دیگر نور در محدوده ضریب شکست بالاتر قرار دارد. دوم بر اساس گاف بلور فوتونی، هنگامی که نور در یک منطقه با ضریب شکست پایین تر از روکش محدود می‌شود. هر دو عامل روی پاشندگی تاثیر گزارند. می‌توان با بهینه‌سازی ساختار و طراحی سطح مقطع فیبر بلور فوتونی ساختارهایی با پاشندگی منفی و تلفات مد نظر ارائه داد.

فناوری ساخت فیبرهای بلور فوتونی دو هسته‌ای، مشابه فناوری ساخت فیبرهای معمولی است و نیاز به تکنولوژی‌های جدید و پیشرفته ندارد ولی فناوری‌های بکار رفته باید برای مواد مختلف مناسب باشند. مواد اولیه برای ساخت این فیبرها شامل پلیمرها یا شیشه سیلیکا است.

۲-پیشینه پژوهش

در پژوهش‌های پیشین فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای برای جبران پاشندگی مثبت با پاشندگی منفی 1200 ps/nm.km و 1800 ps/nm.km ارائه شده است [۶ و ۹]. همچنین اثر تزریق سیال به هسته دوم، تغییر گام، تغییر قطر میله و تغییر حلقه هسته دوم بر منحنی پاشندگی در پژوهش‌های پیشین آورده شده است. در این پژوهش پاشندگی 40000 ps/nm.km محقق شد و پژوهش‌های قبلی با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان ۱ و نرم افزار لومریکال شبیه سازی شده است و نتایج

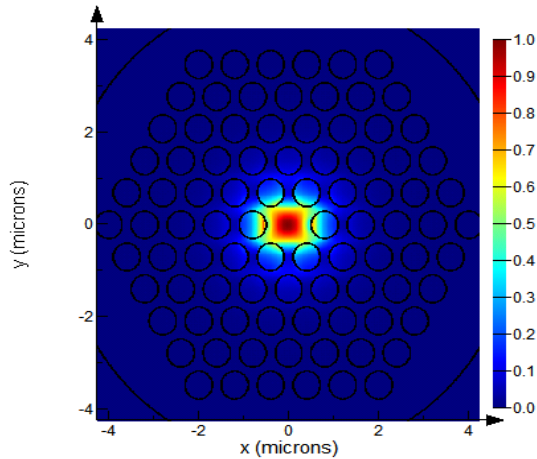
^۱ FDTD

در زمینه‌ی تزریق سیال به هسته دوم و تغییر گام و تغییر شعاع میله‌ها و تغییر مکان هسته دوم و اثری که این تغییرات بر روی نمودار پاشندگی می‌گذارند، بازیابی شده است [۶ و ۹].

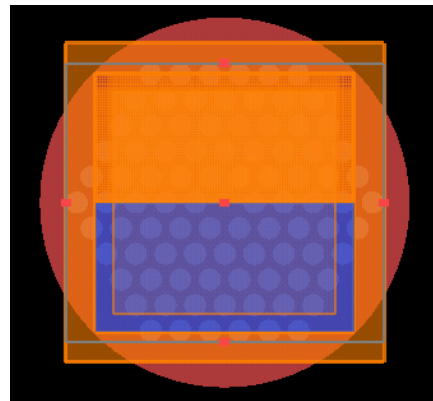
۳- شبیه‌سازی فیبر بلور فوتونی

۳-۱- شبیه‌سازی فیبر بلور فوتونی تک هسته

ساختار شش ضلعی و تک هسته‌ای از ۵ حلقه سوراخ هوا در زمینه‌ی سیلیکا طراحی شده است. با گام ۰.۷ و ۰.۸ میکرون و شعاع‌های متفاوت ۰.۲۵، ۰.۳۰، ۰.۳۵ و ۰.۳۸ میکرون برای گام ۰.۸ میکرون و شعاع‌های ۰.۱۵، ۰.۲۰، ۰.۲۵ و ۰.۳۰ میکرون برای گام ۰.۷ میکرون و با استفاده از ضرایب سل میر می‌توان که نمودارهای پاشندگی را مطابق با مرجع [۶] بازیابی کرد. در شکل ۱ سطح مقطع فیبر به همراه پنجره شبیه‌سازی در برنامه لومریکال مشهود است. سطح مقطع فیبر و تحدید خوب نور در ساختار شش ضلعی طراحی شده را در شکل ۲ قابل مشاهده است. که مطابق با مرجع [۶] است.



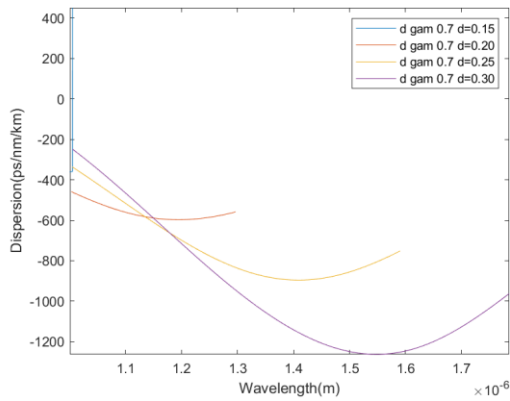
شکل ۲- تحدید وری در فیبر بلور فوتونی



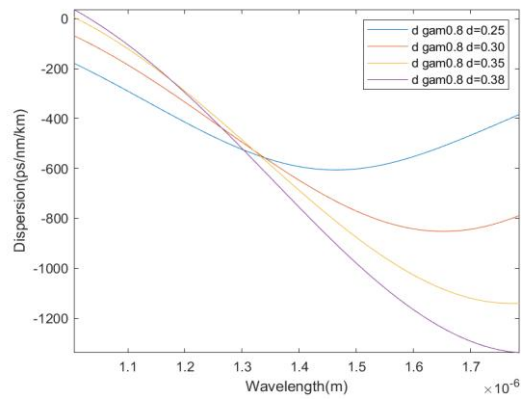
شکل ۱- سطح مقطع فیبر بلور فوتونی

۳-۱-۱- اثر تغییر شعاع حفره‌های حلقه‌ها بر پاشندگی فیبر بلور فوتونی تک هسته

نمودار پاشندگی برای گام ۰.۸ میکرون با شعاع‌های متفاوت ۰.۲۵، ۰.۳۰، ۰.۳۵ و ۰.۳۸ میکرون را در شکل ۳ قابل مشاهده است. با افزایش شعاع حفره‌ها به پاشندگی مینیمم بهتری رسید که بیشترین پاشندگی منفی در گام ۰.۸ میکرون و قطر میله ۰.۳۸ میکرون است که مقدار پاشندگی مینیمم 1200 ps/nm.km است که با مرجع [۶] مطابق است. سائز پنجره شبیه‌سازی در همه نمودارهای شکل ۳ تغییر نکرده است و فقط شعاع تغییر کرده است. منحنی پاشندگی مربوط به گام ۰.۷ میکرون و شعاع‌های ۰.۱۵ و ۰.۲۰ و ۰.۲۵ و ۰.۳۰ میکرون را در شکل ۴ مشهود است. همچنان سائز پنجره شبیه‌سازی ثابت است اما بدلیل اینکه مد پیدا نمی‌شد باید بازه طول موجی متناسب با کاهش شعاع‌های میله کاهش داد. پاشندگی بین 1000 ps/nm.km تا 1250 ps/nm.km در کل باند S و C (بازه طول موجی ۱۴۶۰ نانومتر الی ۱۵۶۵ نانومتر) را مشهود است. پاشندگی رنگی با قسمت حقیقی ضریب شکست موثر همراه طول موج تغییر می‌کند. مقدار پاشندگی منفی بالا، طول فیبر جبران‌کننده پاشندگی را کوتاه‌تر می‌کند.



شکل ۴- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج برای گام ۰.۷ میکرون و قطر متفاوت میله

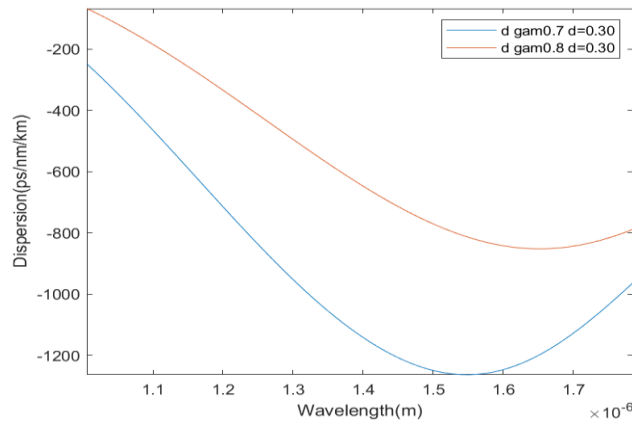


شکل ۳- منحنی پاشندگی مربوط به گام ۰.۸ میکرون و قطر متفاوت میله

۳-۱-۲- اثر تغییر گام بر پاشندگی فیبر بلور فوتونی تک هسته

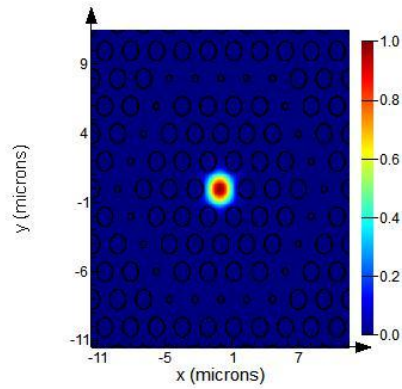
در شکل ۵ از مقایسه دو فیبر بالا با گام ۰.۸ و ۰.۷ میکرون با شعاع ثابت ۰.۳ میکرون واضح و مشهود است که افزایش گام باعث کاهش پاشندگی منفی می شود. برای گام ۰.۷ میکرون به پاشندگی مینیمم 1200 ps/nm.km - بدست آمد. گام ۰.۸ میکرون به پاشندگی 800 ps/nm.km - رسید.

۳-۲- ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با هفت حلقه سوراخ هوا

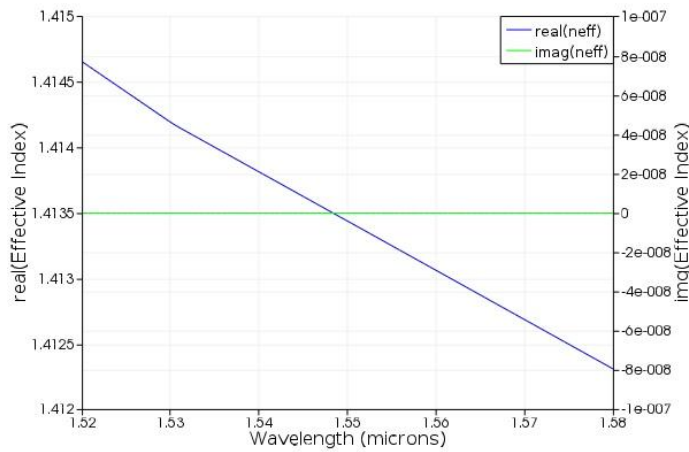


شکل ۵- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج برای شعاع ثابت ۰.۳ میکرون و گام متفاوت

فیبر دو هسته‌ای که با هفت حلقه سوراخ هوا در زمینه سیلیکا در شکل ۶ ایجاد شده است. که هسته اول از حذف میله مرکزی ایجاد شده است و هسته دوم با تغییر قطر میله‌های حلقه چهارم ایجاد شده است. در واقع هسته اول از میله سیلیکای جامد تشکیل شده است. این دو حلقه بازتاب داخلی کلی موجب را تنظیم می کنند. به پاشندگی منفی خیلی بالا 2200 ps/nm/km - دست پیدا کرده اند. با تنظیم قطر فیبر طول موج فاز تطبیقی احتمالاً تنظیم می شود. شبیه سازی های تطبیق یافته با روش FDFD و تنظیم مقدار پاشندگی کروماتیک در باند C خوب است. برای طول موج های کمتر از λ_0 انتشار میدان در هسته مرکزی محدود است. برای طول موج های نزدیک λ_0 کوپلینگ بین هسته داخلی و خارجی است و برای طول موج های بزرگتر از λ_0 هدایت در هسته بیرونی است. در شکل ۶ سطح مقطع فیبر دو هسته‌ای ارائه شده را قابل مشاهده است. گام ۲.۳ میکرون ، شعاع میله های بزرگ ۰.۷ میکرون و شعاع میله های کوچک ۰.۲۵۵ میکرون می باشد [۷].



شکل ۶- تحدید نور در فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با هفت حلقه سوراخ هوا

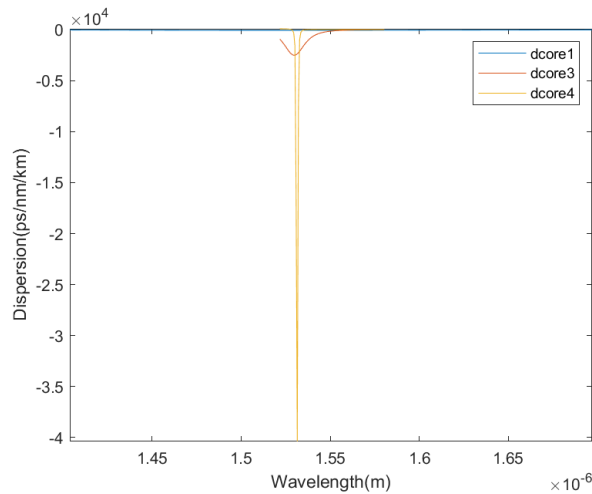


شکل ۷- ضریب شکست بر حسب طول موج

ضریب شکست مطابق نمودار شکل ۷ می‌باشد.

۳-۲-۱- پاشندگی برای تغییر هسته دوم

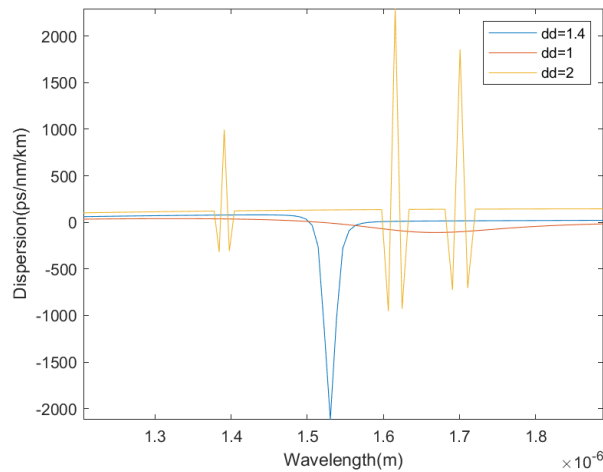
پاشندگی برای زمانیکه حلقه اول هسته دوم باشد مقدار 70 ps/nm/km - است وقتی که حلقه دوم هسته دوم باشد ساخت لایه‌ها برقرار است و کاربرد تقسیم طول موجی تسهیم جبران یافته با فیبر یک لایه زیرا منحنی کاهنده شبه خطی روی باند بزرگ طول موج با بازده پاشندگی بالا. نمودارهای پاشندگی مطابق شکل ۸ است.



شکل ۸- تغییرات پاشندگی بر حسب طول موج و تغییر موقعیت هسته دوم

۳-۲-۲- پاشندگی برای میله‌ها با قطر متفاوت

در نمودار شکل ۹ همه پارامترها بجز قطر میله‌ها ثابت هستند و وقتی قطر میله مقدار ۱ میکرون است پاشندگی مقدار $ps/nm/km$ ۱۰۰ - است وقتی قطر میله ۱.۴ میکرون است پاشندگی مقدار $ps/nm/km$ ۲۰۰۰ - است. با توجه به نمودارها مشهود است که هرچه قطر میله‌ها افزایش یابد مینیمم پاشندگی به طول موج‌های پایین‌تر می‌رود و مقدار پاشندگی منفی زیادتر می‌شود.

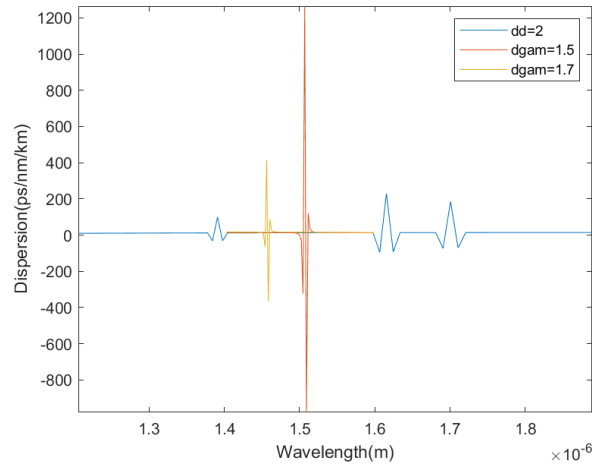


شکل ۹- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج و تغییر قطر میله‌ها

۳-۲-۳- پاشندگی برای گام‌های متفاوت

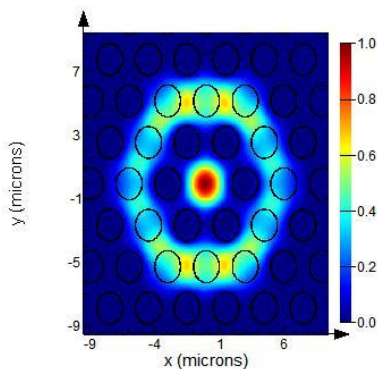
در شکل ۱۰ پاشندگی فیبر برای زمانی که هسته دوم حلقه دوم است نشان داده شده است همه پارامترها جز گام ثابت نگه داشته شده‌اند. زمانی که گام ۱.۵ میکرون است مینیمم پاشندگی مقدار $ps/nm/km$ ۹۰۰۰ - است و زمانی که گام ۱.۷ میکرون است مینیمم پاشندگی مقدار $ps/nm/km$ ۴۰۰۰ - است و زمانی که گام ۲.۳ میکرون است مینیمم پاشندگی مقدار $ps/nm/km$ ۱۰۰۰ - است. وقتی گام کاهش و قطر افزایش می‌یابد. پاشندگی مینیمم به طول موج‌های کوتاه‌تر شیفت پیدا می‌کند و FWHM باریک‌تر می‌شود.

۳-۳- ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با پنج حلقه سوراخ هوا با تزریق پلیمر



شکل ۱۰- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج و تغییر گام

فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای مرکزی ارائه شده است. که در طراحی این فیبر از ۴ حلقه سوراخ هوا و یک حلقه سوراخ از جنس پلیمر با ضریب شکست بالا در زمینه سیلیکا استفاده شده است. که هسته دوم از جنس پلیمر با ضریب شکست بالا است. گام ۳ میکرون و شعاع ۱ میکرون در طول موج ۱.۶۶ میکرون است. ضریب شکست هوا برابر ۱ است و ضریب شکست پلیمر ۱.۵۲ است. استفاده از FEM با شرایط مرزی ضریب شکست موثر و توزیع میدان و حالت هدایت شده را در ادامه بررسی می‌شود. در شکل ۱۱ تحدید نور را در بین دو هسته قابل مشاهده است. نور از این دو هسته خارج نمی‌شود. توزیع میدان ماکزیمم در ناحیه هسته مرکزی و پخش ناحیه هسته دوم در شکل مشخص است. پاشندگی به ساختار هسته داخلی حساس است. حالت بنیادی خیلی محدود به ناحیه هسته است [۸].

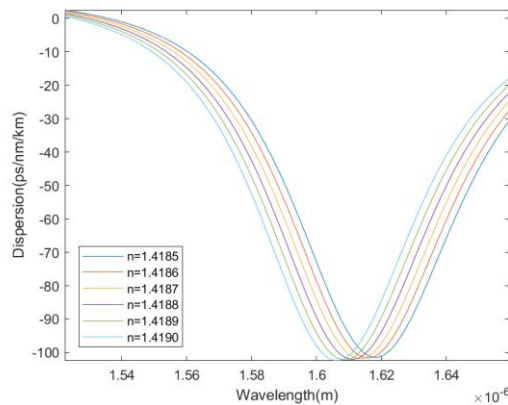


شکل ۱۱- تحدید نور در فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با تزریق پلیمر

از این فیبر بعنوان جبران کننده‌ی پاشندگی در سیستم‌های WDM استفاده می‌شود. پهنای باند حدوداً ۶۰ نانو متر دارد. که این پاشندگی منفی سه برابر پاشندگی منفی مرسوم است. پاشندگی رنگی زیاد از -255ps/nm/km تا -823ps/nm/km ایجاد می‌شود که با وجود تغییر درجه حرارت و بدنبال آن تغییر ضریب شکست موثر تمام باند C را پوشش می‌دهد که نشان می‌دهد یک انتخاب بلقوه برای جبران کننده پاشندگی منفی است.

۳-۳-۱- اثر تغییر ضریب شکست پلیمر بر پاشندگی

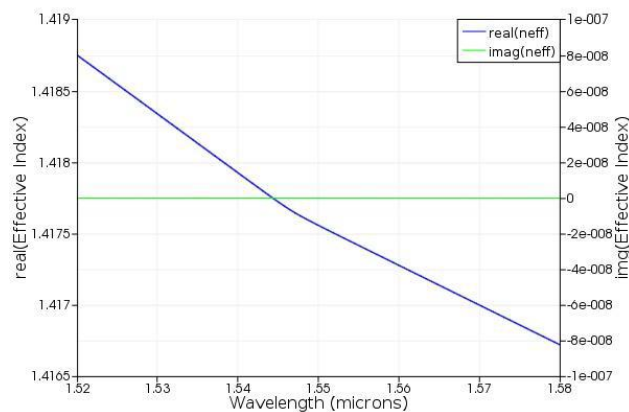
پیک پاشندگی طول موج وقتی که مقدار ضریب شکست موثر از ۱.۴۱۸۵ تا مقدار ۱.۴۱۹۰ تغییر می کند، تغییر می کند. پس اگر بخواهد پیک پاشندگی را روی طول موج در حد ۰.۰۲ میکرون جا به جا شود می شود پلیمر تزریق کرد و اگر که دما تغییر کند این پیک پاشندگی تغییر می کند. با افزایش ضریب شکست پلیمر، پیک پاشندگی به سمت طول موج های کوتاه تر می رود. در شکل ۱۲ مشهود است.



شکل ۱۲- پاشندگی بر حسب طول موج برای پلیمرهای متفاوت

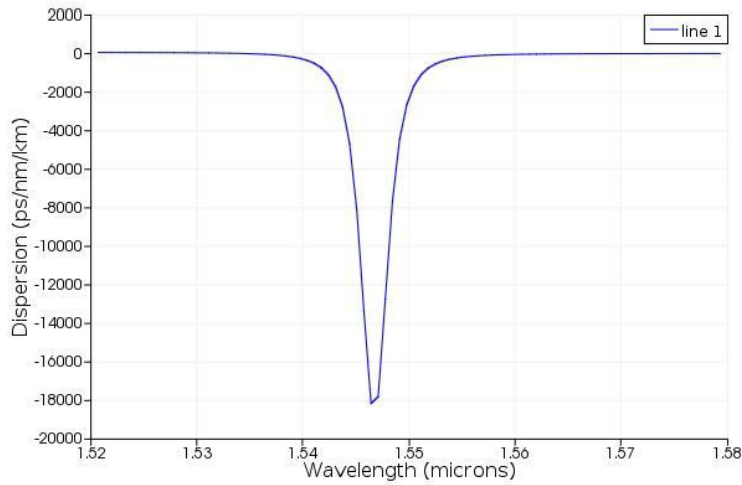
۳-۳-۲- ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته ای با هفت حلقه سوراخ هوا با تزریق سیال با ضریب شکست بالا

فیبر بلور فوتونی دو هسته ای با هفت حلقه شش ضلعی از سوراخ های هوا، که هسته ای اول هسته جامد است و هسته ای دوم از تزریق سیال در حلقه چهارم تشکیل شده است. گام ۲.۳ میکرون و قطر حفره ها ۰.۲ میکرون و ضریب شکست سیال تزریق شده به هسته دوم برابر است با مقدار ۰.۳۸۷۱ است. برای طول موج های کمتر از ۰.۱۱ مد داخلی، مد بنیادی است و انتقال با قدرت در محدوده ناحیه مرکزی دارد. برای طول موج ۰.۱۱ دو مد کوپلینگ خوبی دارند و انتشار میدان نوری بین هسته داخلی و هسته بیرونی با سرعت تغییر می کند. برای طول موج های بیشتر از ۰.۱۱ مد بیرونی قدرت بیشتری از مد درونی دارد. شکل ۱۳ وابستگی ضریب شکست را به طول موج نشان می دهد [۹].



شکل ۱۳- ضریب شکست بر حسب طول موج

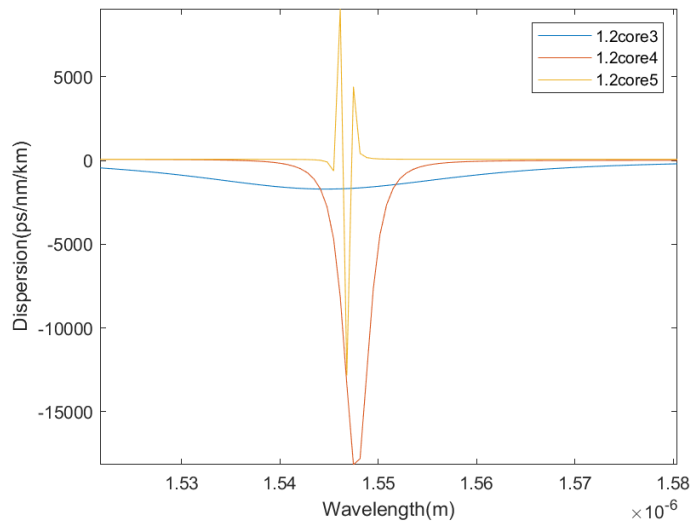
در شکل ۱۴ پاشندگی مقدار 18000 ps/nm/km می شود.



شکل ۱۴- پاشندگی بر حسب طول موج برای ساختار شش ضلعی

۳-۳-۳- اثر تغییر حلقه هسته دوم بر پاشندگی

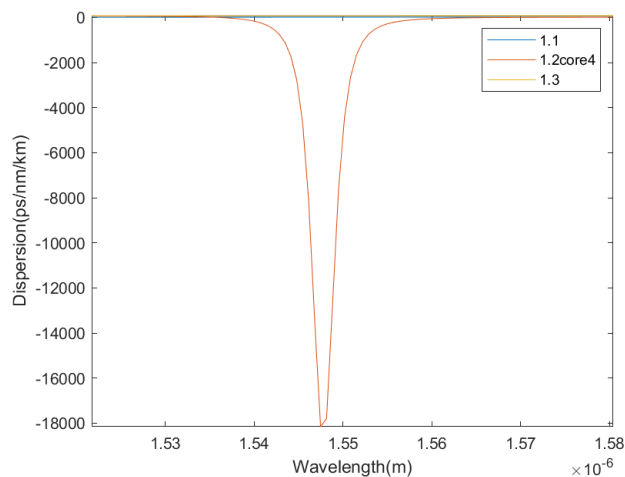
وقتی حلقه هسته دوم تغییر کند و به حلقه‌های سوم و دوم برود. تغییرات پاشندگی را در نمودار شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. پاشندگی زمانی که حلقه سوم هسته دوم باشد مقدار 1000 ps/nm/km می‌باشد. هرچه به حلقه‌های بالاتر برود طول موج پاشندگی مینیمم به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر می‌رود.



شکل ۱۵- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج و تغییر هسته ثانویه

۳-۳-۴- اثر تغییر قطر میله‌ها بر پاشندگی

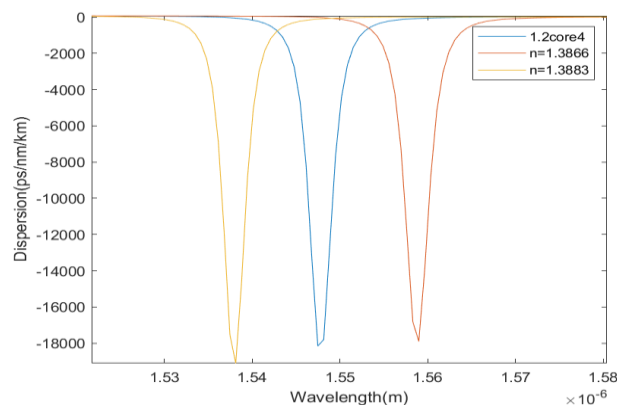
با افزایش قطر سوراخ‌های حلقه پاشندگی به طول موج‌های بالاتر می‌رود و مقدار پاشندگی منفی بزرگ‌تر می‌شود. می‌توان با توجه به D و پارامترهای هندسی d را تنظیم کرد. شکل ۱۶ بیانگر این تغییرات است.



شکل ۱۶- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج برای قطر میله متفاوت

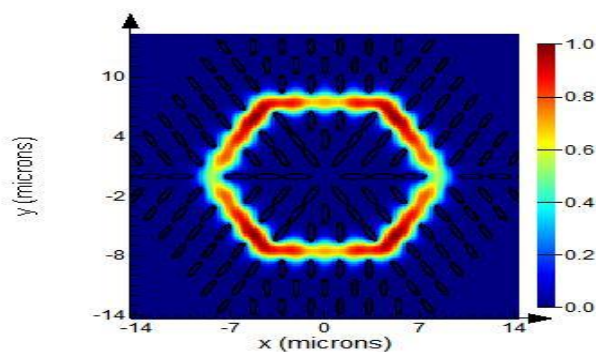
۳-۳-۵- اثر تغییر ضریب شکست سیال بر پاشندگی

در شکل ۱۷ با افزایش ضریب شکست سیالی که به هسته دوم تزریق می‌شود. پاشندگی مینیمم به سمت طول موج‌های کمتر می‌رود.



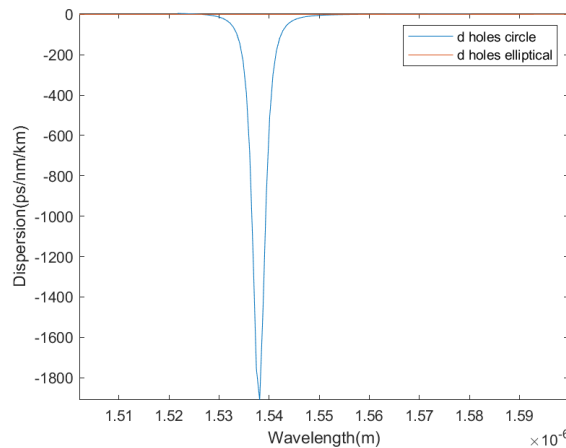
شکل ۱۷- منحنی پاشندگی بر حسب طول موج برای ضریب شکست متفاوت سیال

۳-۳-۶- اثر تغییر میله‌های دایره‌ای به بیضی در ساختار شش ضلعی



شکل ۱۸- تحدید ساختار با میله های شش ضلعی

در شکل ۱۸ تحدید خوبی را در ساختار با میله‌های بیضی مشهود است. در شکل ۱۹ از مقایسه فیبر بلور فوتونی دوهسته‌ای با میله‌های دایره‌ای در زمینه سیلیکا با فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با میله‌های بیضی شکل در زمینه سیلیکا دریافت می‌شود که فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با میله‌های بیضی شکل مینیمم پاشندگی دارد اما فیبر بلور فوتونی دوهسته‌ای با میله دایره‌ای پاشندگی منفی بیشتری دارد.



شکل ۱۹- پاشندگی فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با میله دایره‌ای و بیضی

۴- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تغییرات و تاثیر آن‌ها بر پاشندگی به صورت زیر فهرست شده است.

الف: اثر افزایش شعاع حفره‌های حلقه بعد از هسته مرکزی در ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با شبکه شش ضلعی: با افزایش این شعاع پاشندگی منفی افزایش می‌یابد.

ب: اثر افزایش شعاع حفره‌های حلقه هسته دوم در ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با شبکه شش ضلعی: با افزایش این شعاع تا مقدار مشخصی مشاهده می‌شود پاشندگی منفی بیشتر می‌شود اما بعد از آن نقطه اوج پاشندگی منفی کمتر می‌شود.

ج: اثر افزایش شعاع حلقه‌های بعد از هسته دوم در ساختار فیبر بلور فوتونی دوهسته‌ای با شبکه شش ضلعی: هر چه این شعاع افزایش پیدا کند پاشندگی تغییر آنچنانی نمی‌کند. تقریباً پاشندگی یکنواخت می‌ماند.

د: اثر افزایش حلقه هسته‌ی دوم در ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با شبکه شش ضلعی: وقتی از حلقه دوم به حلقه سوم بروید پاشندگی از مقدار منفی وارد مقدار مثبت می‌شود اما به حلقه‌های بالاتر که بروید پاشندگی تغییر قابل توجهی ندارد. پس برای پاشندگی حلقه دوم و سوم را مورد توجه قرار دارد.

ه: اثر افزایش حلقه، تزریق سیال به حفره‌های حلقه‌ی هسته دوم در ساختار فیبر بلور فوتونی دوهسته‌ای با شبکه شش ضلعی: هر چه به حلقه‌های بالاتر بروید بعنوان حلقه دوم سیال در حفره‌های آن تزریق می‌شود، طول موج پاشندگی مینیمم به سمت طول موج‌های بزرگتر می‌رود.

و: اثر افزایش شعاع حفره‌های همه‌ی حلقه‌ها در ساختار فیبر بلور فوتونی دوهسته‌ای با شبکه شش ضلعی که در هسته دوم سیال تزریق شده‌است: با افزایش شعاع حفره‌های همه‌ی حلقه‌ها به طول موج‌های بزرگتر و مقدار پاشندگی منفی بزرگتر می‌رسد. می‌توان با توجه به D و λ_p پارامترهای هندسی d (شعاع) را تنظیم کرد.

ز: اثر افزایش ضریب شکست سیال تزریقی در حفره‌های حلقه هسته دوم ساختار فیبر بلور فوتونی دو هسته‌ای با ساختار شش ضلعی: هر چه ضریب شکست سیال تزریقی افزایش پیدا کند ماکسیمم پاشندگی منفی به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر می‌رود.

ح: اثر افزایش ثابت شبکه بر مشخصه پاشندگی: با افزایش گام پاشندگی به طور یکنواخت کاهش پیدا می کند. یعنی اگر محور عرض نشانگر پاشندگی و محور طول نشان دهنده طول موج باشد، نمودار پاشندگی به سمت بالا شیفیت پیدا می کند.
 ط: اثر تغییر میله‌های دایره‌ای به میله‌های بیضی در ساختار شش ضلعی: با تغییر سطح مقطع میله‌ها از دایره‌ای به بیضی منحنی پاشندگی تقریباً ثابت ماند بجز یک پاشندگی مینیمم نسبی که در طول موج خاصی ارائه داد.

۵- مراجع

1. G. Lu, B. Fei. (2014) Medical hyperspectral imaging: a review laser, NCBI. Journal of Biomedical Optics , vol. 19, no. 1, pp. 0109011- 01090123.
۲. سارا. تقی لو. (۱۳۹۳). بررسی نظری کنترل پاشندگی فیبرهای بلور فوتونی در محدوده طول موج مخابراتی ، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، پردیس بین المللی ارس، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، گروه فوتونیک، بهمن.
۳. طوبی. ایزدی. (۱۳۹۱). بررسی عوامل موثر بر روابط پاشندگی در پراکندگی القایی رامان برای فیبر بلور فوتونی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فیزیک، شهریور.
۴. کاوه. خاتمی. (۱۳۸۶). مروری بر ساختار، ویژگی‌ها و فناوری ساخت فیبرهای کریستال فوتونی، دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران.
5. P. S. J. Russell. (2006). Photonic Crystal Fibers, IEEE. Journal of LIGHTWAVE technol., vol. 24, no. 12, pp. 4729-4749.
6. F.Beggum, A. Azad, S.Abu bakar, and I. Petra.(2016).designing dispersion compensating microstructure optical fiber , International jornal of engineering and technology, vol. 8, no 2.
7. F. Gérôme, J.-L. Auguste, and J.-M. Blondy.(2004). Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber, OPTICS LETTERS 2725, vol. 29, no. 23.
8. X.Cheng, J.yuan,and J.zou, and X.sang, and B. yan , and K.wang , and C.ya ,ands.wei,and l.li.(2014). design on dual-core polymer-filled photonic crystal fiber for broadband dispersion compensation, state key laboratory of information photonics and optical communications, beijing university of posts and telecommunications, Beijing, china 100876, vol.9271 92712H-1.
9. Chin-ping Yu, Jia-hong Liou, and Hung-chun Chang , Dual-core Liquid-filled Photonic Crystal Fibers for Dispersion Compensation.