بسم الله الرحمن الرحیم

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **فهیمه تقی‌پور** معتهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه که حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می باشد.

نام ونام خانوادگی دانشجو

فهیمه تقی‌پور

امضاء

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

طراحی و شبیه‌سازی فیبر کریستال فوتونی به منظور کمینه کردن همزمان پاشیدگی و تلفات تحدید

نگارش

فهیمه تقی پور

استاد راهنما: دکتر سعید علیایی

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق–الکترونیک

اسفند ماه ۱۳۸۹

با تشکر از استاد گرامی جناب آقای دکتر سعید علیایی که با راهنمایی‌های خود
مرا در انجام این پروژه یاری دادند.

این پایان‌نامه طبق قرارداد شماره ۱۷۵۷۱/۵۰۰ مورخ ۸۸/۱۲/۳ مورد حمایت مرکز تحقیقات مخابرات ایران قرار گرفته، که بدین‌وسیله از همکاری‌های آن مرکز تشکر و قدردانی می‌نماید.

چکیده

در سال‌های اخیر سامانه‌های مخابرات فیبر نوری نقش بسیار چشم‌گیر و مهمی در شبکه‌های مخابراتی به عهده دارند. به‌طور پیوسته تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود عملکرد آن‌ها صورت می-گیرد و همواره، روش‌ها و فن‌آوری‌هایی جدیدی معرفی می‌شوند. یکی از این فن‌آوری‌های جدید و مهم، ابداع فیبرهای کریستال فوتونی (PCF) است. این نوع فیبرها دارای ویژگی‌های منحصربه فردی از قبیل عملکرد تک مود وسیع، پاشیدگی رنگی انعطاف‌پذیر در محدوده طول موج گسترده، خاصیت غیرخطی قابل کنترل و اثر دوشکستی بالا است.

برای سامانه‌های انتقال اطلاعات نوری، وجود فیبرهای کریستال فوتونی پاشیدگی تخت، در محدوده‌ی وسیع طول موج ضروری است. در فیبرهای کریستال فوتونی مرسوم با قطرحفره‌های هوای یکسان درناحیه غلاف، می‌توان شیب پاشیدگی را با کاهش نسبت بین اندازه حفره‌ها d و ثابت شبکه Λ، کم کرد اما این امر باعث بالارفتن تلفات تحدید می‌شود. فیبرهای کریستال فوتونی را می‌توان به دو گروه اصلی فیبرهای هدایت نمایه و فیبرهای شکاف باند فوتونی تقسیم کرد.

در این پایان‌نامه به منظور کاهش همزمان پاشیدگی و تلفات تحدید، چهار فیبر کریستال فوتونی هدایت نمایه پیشنهاد شده است. ساختار شبکه فیبرهای کریستال فوتونی پیشنهادی اول و دوم، مثلثی است. طراحی اول با ۶ حلقه حفره هوا در طول موج 1.55µm پاشیدگی -0.000467ps/nm.km از خود نشان می‌دهد. طراحی دوم با ۷ حلقه حفره هوا برای محدوده‌ی وسیع‌تری از طول‌موج‌ها (1.1- 1.7 µm) مناسب بوده و پاشیدگی آن بین 2.3-2.35 ps/nm.km است. فیبر پیشنهادی سوم، ساختار شبکه مربعی و ۵ حلقه حفره هوا دارد و منحنی پاشیدگی آن در محدوده‌ی وسیعی از طول موج‌ها بین 1- و 2.6 ps/nm.km نوسان می‌کند. چهارمین فیبر کریستال فوتونی دارای ساختار هشت ضلعی با ناحیه مغزی ناخالص‌شده است. فیبرهای کریستال فوتونی هشت ضلعی به علت داشتن حفره‌های هوای بیشتر در ناحیه غلاف نسبت به فیبرهای کریستال فوتونی شش ضلعی مشابه، تلفات تحدید کمتری از خود نشان می‌دهند. در تمام طراحی‌ها، تلفات تحدید از مرتبه $۱۰^{-۶}$dB/km یا $۱۰^{-۷}$ است.

در فرآیند ساخت عملی فیبرهای کریستال فوتونی، نوسان حفره‌های هوا به‌خصوص در حلقه‌های درونی‌تر اجتناب ناپذیر است. از این‌رو در طراحی فیبرهای کریستال فوتونی، بررسی حساسیت منحنی‌های پاشیدگی و تلفات تحدید نسبت به خطای ساخت پارامترهای ساختاری فیبر، اهمیت ویژه دارد. برای طراحی‌های دوم و سوم خطای فرایند ساخت بررسی شده است.

در مجموع، بهترین نتیجه به‌دست آمده مربوط به فیبر کریستال فوتونی با ساختار هشت ضلعی است. در این طرح، پاشیدگی در محدوده طول موج 1.25-1.65µm تغییراتی بین 0±0.1 ps/nm.km دارد و تلفات تحدید آن برای طول موج‌های کوچک‌تر از 1.65µm، کمتر از 7×10^{-7} dB/km است. این طرح، با وجود پاشیدگی صفر فوق تخت و تلفات تحدید پایین در محدوده‌ی طول موج وسیع، محیطی ایده‌آل برای انتقال پهن‌باند در مخابرات است.

کلمات کلیدی: تلفات تحدید، پاشیدگی، فیبر کریستال فوتونی، فیبر نوری

فهرست مطالب

فصل اول: مبانی ساختارهای کریستال فوتونی ۱
۱-۱- مقدمه ۲
۱-۲- معرفی ساختارهای کریستال فوتونی و انواع آن‌ها ۲
۱-۳- مفاهیم اساسی در شبکه‌های کریستال فوتونی ۶
۱-۳-۱- مقدارکسر پرشدگی و ضریب شکست مؤثر ۷
۱-۳-۲- ثابت شبکه ۷
۱-۳-۳- مقیاس پذیری ۷
۱-۳-۴- شبکه هم پاسخ و ناحیه بریلوین ۸
۱-۳-۵- نمودار شکاف باند فوتونی کریستال فوتونی ۸
۱-۴- کاربردهای کریستال‌های فوتونی ۱۰
۱-۴-۱- کاربردهای درون شکاف باند ۱۱
۱-۴-۱-۱- کاربرد در کاواک ۱۱
۱-۴-۱-۲- کاربرد در موجبرها ۱۲
۱-۴-۱-۳- کاربرد در فیبرهای کریستال فوتونی ۱۲
۱-۴-۱-۴- کاربرد در ساخت فیلترهای غیرخطی ۱۲
۱-۴-۲- کاربردهای خارج شکاف باند ۱۳
۱-۴-۲-۱- کاربرد در ابر عدسی‌ها ۱۴
۱-۴-۲-۲- کاربرد در ابر منشورها ۱۴
۱-۵- نتیجه گیری ۱۵
فصل دوم: فیبرهای کریستال فوتونی ۱۷
۲-۱- مقدمه ۱۷
۲-۲- تاریخچه پیدایش فیبرهای کریستال فوتونی ۱۸
۲-۳- انواع فیبرهای کریستال فوتونی و سازوکار هدایت آن‌ها ۱۹
۲-۳-۱- فیبر مغزی هوا ۲۰
۲-۳-۱-۱- فیبرهای کریستال فوتونی هدایت کننده‌ی نور در هوا ۲۲
۲-۳-۱-۲- فیبر کریستال فوتونی دارای مغزی با ضریب شکست کم ۲۳
۲-۳-۱-۳- فیبر براگ ۲۳
۲-۳-۲- فیبرهای مغزی جامد ۲۳
۲-۳-۲-۱- فیبر کریستال فوتونی با ناحیه‌ی مودی بزرگ ۲۴
۲-۳-۲-۲- فیبر کریستال فوتونی با روزنه عددی زیاد ۲۵
۲-۳-۲-۳- فیبر کریستال فوتونی غیر خطی ۲۵

۲-۴- مشخصات فیبرهای کریستال فوتونی ۲۵
۲-۴-۱- پاشیدگی در فیبرهای کریستال فوتونی ۲۵
۲-۴-۲- عملکرد تک مود در فیبر کریستال فوتونی مغزی جامد ۲۷
۲-۴-۳- تلفات تحدید ۲۹
۲-۴-۴- ناحیه موثر مودی ۳۰
۲-۵- روش‌های ساخت فیبرهای کریستال فوتونی ۳۰
۲-۶- نتیجه‌گیری ۳۲
فصل سوم: روش‌های تحلیل فیبرهای کریستال فوتونی ۳۵
۳-۱- مقدمه ۳۵
۳-۲- روش‌های تحلیل عددی ۳۵
۳-۲-۱- روش تفاضل متناهی در زمان ۳۸
۳-۲-۱-۱- معادلات ماکسول و فرم تفاضلی آنها ۳۹
۳-۲-۳- روش ضریب شکست موثر ۴۱
۳-۲-۳-۱- مزایا و معایب روش ضریب شکست موثر ۴۲
۳-۳- مقایسه روش‌های تحلیل فیبرهای کریستال فوتونی ۴۳
۳-۴- شرایط مرزی ۴۵
۳-۴-۱- شرط مرزی PML ۴۵
۳-۵- نتیجه‌گیری ۴۸
فصل چهارم: بررسی ساختارهای جدید فیبرهای کریستال فوتونی با پاشیدگی و تلفات تحدید اندک ۵۰
۴-۱- مقدمه ۵۰
۴-۲- فیبرهای کریستال فوتونی با حفره‌های هوای هم‌اندازه‌ی دایره شکل ۵۱
۴-۲-۱- طراحی اول ۵۱
۴-۲-۲- طراحی دوم ۵۴
۴-۳- فیبرهای کریستال فوتونی با حفره‌های دایره شکل و اندازه‌های متفاوت ۵۸
۴-۳-۱- طرح اول ۵۸
۴-۳-۲- طرح دوم ۶۰
۴-۴- فیبر کریستال فوتونی با حفره‌های هوای دایره‌ای و غلاف دولایه ۶۳
۴-۴-۱- طرح اول ۶۳
۴-۴-۲- طرح دوم ۶۶
۴-۵- فیبرکریستال فوتونی با حفره‌های هوای درونی بیضی شکل ۷۱
۴-۶- فیبر کریستال فوتونی با ناحیه مرکزی ناخالص شده ۷۵
۴-۷- فیبرهای کریستال فوتونی هشت ضلعی ۷۷

۴-۸- فیبر کریستال فوتونی با مغزی دارای نقص چندگانه و دوشکستگی زیاد ۷۹
۴-۹- نتیجه‌گیری ۸۲
فصل پنجم: نتایج طراحی فیبرهای کریستال فوتونی به منظور دستیابی به پاشیدگی و تلفات تحدید ۸۴
۵-۱- مقدمه ۸۴
۵-۲- فیبر کریستال فوتونی با مغزی واحد و ناحیه موثر مودی کوچک ۸۴
۵-۳- فیبر کریستال فوتونی با ناحیه موثر مودی بزرگ ۹۱
۵-۴- فیبر کریستال فوتونی با ساختار شبکه مربعی ۱۰۴
۵-۵- فیبر کریستال فوتونی هشت ضلعی با مغزی ناخالص شده ۱۱۲
۵-۶- نتیجه‌گیری ۱۱۶
فصل ششم: جمع‌بندی و پیشنهادها ۱۱۷
۶-۱- جمع‌بندی ۱۱۸
۶-۲- پیشنهادها ۱۲۰
منابع ۱۲۲

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱: مروری بر پیشرفت فیبرهای کریستال فوتونی ۲۰
جدول ۳-۱: مقایسه روش‌های مختلف تحلیل فیبرهای کریستال فوتونی ۴۳

فهرست شکل‌ها

فصل اول

شکل ۱-۱: نمونه ساده‌ای از کریستال فوتونی یک، دو و سه بعدی. رنگ‌های متفاوت نشان‌دهنده مواد با ضریب دی‌الکتریک متفاوت هستند ۳
شکل ۱-۲: کریستال فوتونی یک بعدی الف) برای طول موج‌های واقع در شکاف باند فوتونی ب) برای طول موج‌های خارج از شکاف باند فوتونی ۴
شکل ۱-۳: الف) کریستال فوتونی دوبعدی با شبکه مربعی ب) کریستال فوتونی دوبعدی با شبکه مثلثی ۵
شکل ۱-۴: ساختار کریستال فوتونی حبابی وارون ۶
شکل ۱-۵: ساختار کریستال فوتونی پیچشی چهارگوشی ۶
شکل ۱-۶: نحوه محاسبه ناحیه اول بریلوین در یک شبکه کریستالی..... ۸
شکل ۱-۷: یک کریستال فوتونی دو بعدی و جهت‌های مختلف تابش موج بر آن ۹
شکل ۱-۸: الف)کریستال فوتونی یک بعدی ب) نمودار شکاف باند فوتونی آن برای تابش عمودی ... ۱۰
شکل ۱-۹: الف) کریستال فوتونی دو بعدی ب) نمودار شکاف باند فوتونی..... ۱۰
شکل ۱-۱۰: کاواک کریستال فوتونی با ضریب کیفیت بسیار بالا و حجم مود کوچک..... ۱۱
شکل ۱-۱۱: کاربرد کریستال فوتونی در ساخت فیلترهای غیر خطی ۱۳
شکل ۱-۱۲: کاربردهای خارج شکاف باند فوتونی کریستال..... ۱۳
شکل ۱-۱۳: توزیع میدان الکتریکی منبع نقطه‌ای و تصویر آن پس از عبور از کریستال فوتونی دو بعدی با شبکه‌ی مثلثی ۱۴
شکل ۱-۱۴: نحوه عملکرد ابرمنشورها در برخورد با موج ورودی ۱۵

فصل دوم

شکل ۲-۱: فیبر کریستال فوتونی اولیه با قطر سوراخ‌های هوا در حدود ۳۰۰ نانومتر و فاصله‌ی بین سوراخ‌های ۲ تا ۳ میکرون..... ۱۸
شکل ۲-۲: بازتاب داخلی اصلاح شده..... ۱۹
شکل ۲-۳: فیبر کریستال فوتونی مغزی هوا با عملکرد مبتنی بر اثر شکاف باند فوتونی ۲۱
شکل ۲-۴: دسته بندی فیبر های کریستال فوتونی..... ۲۲
شکل ۲-۵: سازوکار هدایت نور در دو نوع فیبر الف) مغزی هوا و ب) مغزی جامد. $n_1 = 1.45$ ضریب شکست شیشه و $n_2 = 1$ ضریب شکست هوا است ۲۴
شکل ۲-۶: مقایسه‌ی پاشیدگی SIF با PCF هسته جامد ۲۷
شکل ۲-۷: یک نمونه منحنی فاز تک مود / چند مود. ۲۹

شکل ۲-۸: ساخت فیبر کریستال فوتونی الف) ساخت هر لوله‌ی مویین مجزا ب) شکل دادن به ساختار ج) کشیدن پیش سازه د) کشیدن فیبر نهایی ۳۱
شکل ۲-۹: فیبرهای کریستال فوتونی که دارای نقص هستند الف) فیبر با حفره‌های نامساوی ب) حفره‌های اضافی در ساختار ج) تغییر مکان حفره‌ها ۳۲

فصل سوم

شکل ۳-۱: دو گروه اصلی تحلیل کریستال‌های فوتونی در روش‌های عددی ۳۷
شکل ۳-۲: روش‌های عددی حوزه زمان در تحلیل کریستال‌های فوتونی ۳۸
شکل ۳-۳: روش‌های عددی حوزه بسامد در تحلیل کریستال‌های فوتونی ۳۸
شکل ۳-۴: الف) فیبر کریستال فوتونی با مغزی جامد ب) فیبر معمولی معادل با نمای پله‌ای ۴۱
شکل ۳-۵: جذب موج توسط شرایط مرزی PML ۴۸

فصل چهارم

شکل ۴-۱: سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی با آرایه‌ای از حفره‌های هوا به صورت شبکه مثلثی . ۵۱
شکل ۴-۲: توزیع میدان الکتریکی دو بعدی الف) برای دو حلقه حفره هوا ب) برای سه حلقه حفره هوا ج) برای چهار حلقه حفره هوا ۵۲
شکل ۴-۳: ناحیه موثر مودی تابعی از تعداد حلقه‌های حفره هوا است. $\Lambda=6.75\mu m, d=6\mu m$ ۵۳
شکل ۴-۴: منحنی پاشیدگی PCF برای ثابت شبکه‌های متفاوت ۵۳
شکل ۴-۵: تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی برای تعداد حلقه‌های حفره هوای متفاوت.
$\Lambda=8.75\mu m, d=5\mu m$ است. ۵۴
شکل ۴-۶: سطح مقطع عرضی فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی ۵۵
شکل ۴-۷: تاثیر تغییرات اندک پارامترهای طراحی بر منحنی پاشیدگی کلی فیبر کریستال فوتونی، الف) تاثیر تغییرات ثابت شبکه، ب) تاثیر تغییرات قطر حفره‌های غلاف d، ج) تاثیر تغییرات قطر حفره هوای مرکزی در مغزی. ۵۶
شکل ۴-۸: ناحیه موثر مودی و تلفات نشتی به صورت تابعی از طول موج برای پارامترهای طراحی بهینه $\Lambda = 2.05\mu m$، $d/\Lambda = 0.73$ و $d_c/\Lambda = 0.279$ ۵۷
شکل ۴-۹: توزیع میدان الکتریکی بهنجار شده در طول موج 1.55μm ۵۷
شکل ۴-۱۰: فیبر کریستال فوتونی پاشیدگی فوق‌تخت با پنج حلقه حفره هوا و $d_5/\Lambda=0.95$
$d_4/\Lambda=0.63$ $d_3/\Lambda=0.55$, $d_2/\Lambda=0.45$ $d_1/\Lambda=0.31$, $\Lambda=1.58\mu m$ ۵۸
شکل ۴-۱۱: الف) منحنی پاشیدگی ب) تلفات تحدید ج) ناحیه موثر مودی برای فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی در شکل۴-۱۰. ..... ۵۹
شکل ۴-۱۲: سطح مقطع عرضی فیبر شکاف باند فوتونی تمام جامد ۶۰
شکل ۴-۱۳: الف) نمودار پاشیدگی و ب) تلفات تحدید فیبر شکاف باند فوتونی تمام جامد با مشخصات $d_1=7.8\mu m$, $d_2=6\mu m$, $\Lambda=8\mu m$, $N_r=14$, $\Delta n=2\%$ ۶۲
شکل ۴-۱۴: نمای سطح مقطع فیبر شکاف باند فوتونی با یک حلقه هوای اضافی ۶۲

شکل ۴-۱۵: مشخصات تلفات تحدید فیبر شکاف باند فوتونی تمام جامد با یک حلقه حفره هوای اضافی $d_1 = d_2 = 6\mu m$, $d_a = 7.8\mu m$, $\Lambda = 8\mu m$, $N_r = 7$, $\Delta n = 2\%$ ۶۳
شکل ۴-۱۶: مقطع عرضی فیبر کریستال فوتونی پیشنهاد شده ۶۴
شکل ۴-۱۷: نمودار پاشیدگی برای فیبر کریستال فوتونی با $\Lambda = 2.4$ μm, $d_2/\Lambda = 0.5$ و d_1/Λ از 0.23 تا 0.27 ..... ۶۴
شکل ۴-۱۸: منحنی الف) تلفات و ب) پاشیدگی برای فیبر کریستال فوتونی با $\Lambda = 2.4$ μm و $d_1/\Lambda = 0.26$ و d_2/Λ از 0.45 تا 0.65 ..... ۶۴
شکل ۴-۱۹: پاشیدگی به عنوان تابعی از طول موج برای فیبر کریستال فوتونی با $d_1/\Lambda = 0.26$، $d_2/\Lambda = 0.5$ و Λ از 2.6 μm _ 2.2 ..... ۶۵
شکل ۴-۲۰: پاشیدگی به عنوان تابعی از طول موج برای فیبر کریستال فوتونی با $\Lambda = 2.452$ μm $d_1/\Lambda = 0.244$, $d_2/\Lambda = 0.58$ و تغییرات ۱۰٪ در اندازه d_2 ..... ۶۵
شکل ۴-۲۱: سطح مقطع DF-PCF پیشنهادی ۶۷
شکل ۴-۲۲: نسبت d_2/Λ_2 و Λ_2 بر حسب R_a و R_n، دراین‌جا $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$ و طول موج 1550 nm است. ۶۷
شکل ۴-۲۳: وابستگی پاشیدگی رنگی به R_a. در این‌جا $\Lambda_1 = 2.3\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$ و $R_n = -0.05\%$. منحنی نقطه – خط چین مربوط به فیبر کریستال فوتونی مرسوم با $\Lambda = 2.4\mu m$ است ۶۸
شکل ۴-۲۴: وابستگی ناحیه موثر روی R_a به عنوان یک تابع از R_n، در این‌جا $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$ و طول موج 1550 nm است. ۶۹
شکل ۴-۲۵: وابستگی تلفات تحدید روی R_n به صورت تابعی از R_a، در این‌جا $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$ و طول موج 1550 nm است. ۶۹
شکل ۴-۲۶: وابستگی ضریب شکست موثر به طول موج، در این‌جا $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$ و $R_a = 1.34$ و $R_n = -0.05\%$. نمودارهای توپر، خط‌چین و نقطه‌چین به‌ترتیب متناظر با مودهای بنیادی، دومی و پرکننده فضا در غلاف بیرونی هستند. ۷۰
شکل ۴-۲۷: طراحی شرایط برای DF-PCF، دراینجا ساختار غلاف داخلی $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$است. منحنی‌های توپر، خط‌چین و نقطه‌چین متناظر با ساختاری هستند که می‌تواند یک طول موج حد بالایی برای عملکرد تک مود 1650 nm، ناحیه موثر $80\mu m^2$ و تلفات تحدید $0.01\frac{dB}{km}$ را نتیجه می‌دهد. ۷۰
شکل ۴-۲۸: مشخصات DF-PCF با $\Lambda_1 = 2.4\mu m$ و $d_1/\Lambda_1 = 0.28$، و $R_a = 1.34$ و $R_n = -0.05\%$، الف) پاشیدگی رنگی ب) ناحیه موثر و تلفات تحدید ۷۱
شکل ۴-۲۹: فیبرکریستال فوتونی پیشنهادی با حفره‌های بیضی کوچکتر در اولین حلقه داخلی و حفره‌های هوای بیضی بزرگتر در دومین حلقه. ۷۲

شکل ۴-۳۰: رفتار پاشیدگی رنگی در فیبرهای کریستال فوتونی با $d = 1.8\mu m$ ، $\Lambda = 2.3\mu m$ ، $a_1 = 0.55\mu m$ ، $b_1 = 0.69\mu m$ ، $a_2 = a_3 = 1.049\mu m$ ، $b_2 = b_3 = 1.335\mu m$ در ازای الف) تغییر فاصله حفره‌های بیضی ب) تغییرات ±2% و ±5% از پارامتر Λ. ۷۳
شکل ۴-۳۱: الف) تلفات تحدید بهینه‌شده برای پارامترهای $d = 1.8\mu m$ ، $\Lambda = 2.3\mu m$ ، $a_1 = 0.55\mu m$ ، $b_1 = 0.69\mu m$ ، $a_2 = a_3 = 1.049\mu m$ ، $b_2 = b_3 = 1.335\mu m$ ب) توزیع میدان الکتریکی بهینه شده در طول موج $1.55\mu m$ ۷۴
شکل ۴-۳۲: الف) پاشیدگی رنگی برای تعداد مختلف حلقه حفره‌های هوا ب) پاشیدگی رنگی فیبر کریستال فوتونی اصلاح شده با بهینه سازی تعداد حلقه‌ها. ۷۴
شکل ۴-۳۳: سطح مقطع عرضی و نمای میدان مود بنیادی فیبر کریستال فوتونی با مشخصات Λ=1.5μm، d_1=1.2μm، d_2=0.24μm، d_3=0.54μm، d_4=0.32μm، d_5=0.36μm، d_6=0.40μm ۷۵
شکل ۴-۳۴: منحنی‌های پاشیدگی با اندازه‌های متفاوت d_1 ..... ۷۶
شکل ۴-۳۵: منحنی‌های پاشیدگی با اندازه‌های متفاوت d_2 ..... ۷۶
شکل ۴-۳۶: منحنی‌های پاشیدگی با اندازه‌های متفاوت d_3 ..... ۷۶
شکل ۴-۳۷: منحنی‌های پاشیدگی با اندازه‌های متفاوت Λ ۷۶
شکل ۴-۳۸: نمودار پاشیدگی با Λ=1.5μm، d_1=1.2μm، d_2=0.24μm، d_3=0.54μm، d_4=0.32μm، d_5=0.36μm، d_6=0.40μm. ۷۷
شکل ۴-۳۹: سطح مقطع OPCF با قطر حفره‌های هوای d_2 ,d_1 و ثابت شبکه Λ_1. ..... ۷۸
شکل ۴-۴۰: نمودار پاشیدگی OPCF پیشنهادی با پارامترهای بهینه ۷۸
شکل ۴-۴۱: تلفات تحدید و ناحیه موثر مودی OPCF پیشنهادی با پارامترهای بهینه ۷۸
شکل ۴-۴۲: سطح مقطع MD-HPCF. A و B کانال‌هایی از حفره‌های هوا هستند که از ساختار حذف شده‌اند. ۷۹
شکل ۴-۴۳: منحنی پاشیدگی MD-HPCF برای پارامترهای طراحی بهینه شده و تغییرات ۱٪ پارامتر d ۸۰
شکل ۴-۴۴: الف) ناحیه موثر و تلفات تحدید برای پارامترهای بهینه شده ب) توزیع میدان مود در λ=1.55μm ۸۰
شکل ۴-۴۵: الف) وابستگی طول موج به الف) دوشکستگی و ب) طول ضربان قطبش در MD-HPCF برای پارامترهای بهینه شده. ۸۱

فصل پنجم

شکل ۵-۱: ساختار اولیه فیبر کریستال فوتونی با قطر حفره d ، ثابت شبکه Λ و ۶ حلقه حفره هوا ۸۵
شکل ۵-۲: نمودارهای پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی اولیه برای قطر حفره‌های مختلف و Λ= 1.3μm ۸۵
شکل ۵-۳: نمودارهای پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی اولیه برای قطر حفره‌های مختلف و Λ = 1.3μm در محدوده طول موج‌های نزدیک 1.55 μm ۸۶

شکل ۵-۴: نمودارهای تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی اولیه برای قطر حفره‌های مختلف و Λ = 1.3µm ۸۶
شکل ۵-۵: نمودارهای تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی اولیه برای قطر حفره‌های مختلف و Λ = 1.3µm در محدوده طول موجهای نزدیک 1.55 µm ۸۷
شکل ۵-۶: ساختار PCF_1 با ثابت شبکه 1.3 µm، قطر حفره‌های هوای چهار حلقه داخلی d=0.90836µm و قطر حفره‌های هوای دو حلقه آخر d_2= 1.2µm است. ۸۷
شکل ۵-۷: نمودار تلفات تحدید PCF_1، الف) در محدوده وسیع طول موج ، ب) در محدوده نزدیک طول موج 1.55µm ۸۸
شکل ۵-۸: الف) ساختار PCF_2 با ثابت شبکه 1.3 µm، قطر حفرههای هوای سه حلقه داخلی d= 0.90836µm و قطر حفره‌های هوای سه حلقه آخر d2= 1.2µm است. ب) توزیع میدان مود در مغزی PCF_2 . ..... ۸۸
شکل ۵-۹: تلفات تحدید PCF_2، الف) در محدوده طول موج وسیع، ب) در محدوده نزدیک طول موج 1.55µm ۸۹
شکل ۵-۱۰: ساختار PCF_3 با ثابت شبکه 1.3 µm و پنج حلقه حفره هوا، قطر حفره‌های هوای سه حلقه داخلی..... ۸۹
شکل ۵-۱۱: تلفات تحدید PCF_3، الف) در محدوده طول موج وسیع، ب) در محدوده نزدیک طول موج 1.55µm..... ۹۰
شکل ۵-۱۲: مقایسه نمودارهای پاشیدگی PCF_1، PCF_2 و PCF_3 در محدوده نزدیک طول موج 1.55µm ۹۰
شکل ۵-۱۳: الف) سطح مقطع PCF اولیه که حفره‌های هوا در غلاف آن با ساختار مثلثی و ثابت شبکه Λ نظم گرفته‌اند. قطر حفره‌های دو حلقه داخلی d_1 و قطر حفره‌های چهار حلقه خارجی d_2 است. Λ = 2.3 µm وd_1=0.6 µm d_2=1.8 µm. ب) توزیع میدان الکتریکی مود اصلی در 1.55µm ۹۲
شکل ۵-۱۴: الف) تلفات تحدید ب) نمودار پاشیدگی PCF اولیه با Λ = 2.3 µm ، d_1=0.6 µm و d_2=1.8 µm..... ۹۲
شکل ۵-۱۵: سطح مقطع DF-PCF با ثابت شبکه Λ_1 برای حلقه اول و Λ برای حلقه دوم تا هفتم. d_1 قطر حفره‌های حلقه اول، d_2 قطر حفره‌های حلقه دوم، d_3 قطر حفره‌های پنج حلقه آخر است. ۹۳
شکل ۵-۱۶: منحنی ضریب شکست موثر غلافDF-PCF نسبت به طول موج، برای پارامترهای ساختاری اولیه. ۹۴
شکل ۵-۱۷: اثر تغییر ثابت شبکه بر نمودار پاشیدگی DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_2= 0.32 µm, d_3=1.78µm..... ۹۴
شکل ۵-۱۸: اثر تغییر ثابت شبکه بر نمودار تلفات تحدید DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_2= 0.32 µm, d_3=1.78µm..... ۹۵

شکل ۵-۱۹: اثر تغییر d_3 بر نمودار پاشیدگی DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_2= 0.32 µm, Λ=2.3µm ۹۵
شکل ۵-۲۰: اثر تغییر d_3 بر نمودار تلفات تحدید DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_2= 0.32 µm, Λ=2.3µm ۹۶
شکل ۵-۲۱: اثر تغییر d_2 بر نمودار پاشیدگی DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_3= 1.8 µm, Λ=2.3µm ۹۶
شکل ۵-۲۲: اثر تغییر d_2 بر نمودار تلفات تحدید DF-PCF با d_1= 0.4 µm, d_3= 1.8 µm, Λ=2.3µm ۹۷
شکل ۵-۲۳: اثر تغییر d_1 بر نمودار پاشیدگی DF-PCF با d_2= 0.32 µm, d_3= 1.8 µm, Λ=2.3µm ۹۸
شکل ۵-۲۴: اثر تغییر d_1 بر نمودار تلفات تحدید DF-PCF با d_2= 0.32 µm, d_3= 1.8 µm, Λ=2.3µm ۹۸
شکل ۵-۲۵: توزیع میدان الکتریکی مود اصلی DF-PCF با d_1=0.42 µm, d_2=0.32 µm, d_3=1.8 Λ=2.3µm ۹۹
شکل ۵-۲۶: تاثیر تغییرات ۲٪± و ۵٪± اندازه‌ی d_1 بر منحنی الف) پاشیدگی و ب) تلفات تحدید. ۱۰۰
شکل ۵-۲۷: منحنی‌های الف) پاشیدگی و ب) تلفات تحدید در اثر تغییرات ۲٪± و ۵٪± اندازه‌ی d_2. ..... ۱۰۱
شکل ۵-۲۸: تاثیر تغییرات ۲٪± و ۵٪± اندازه‌ی d_3 بر منحنی الف) پاشیدگی و ب) تلفات تحدید. ۱۰۲
شکل ۵-۲۹: تاثیر تغییرات ۲٪± و ۵٪± اندازه‌ی Λ بر منحنی الف) پاشیدگی و ب) تلفات تحدید. ۱۰۳
شکل ۵-۳۰: سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی با ساختار شبکه مربعی. قطر حفره‌های حلقه اول و حلقه دوم به جز چهارگوشه حلقه دوم، d_1، قطر حفره‌های هوای حلقه سوم به جز چهار گوشه حلقه، d_2، قطر حفره‌های هوای حلقه چهارم و پنجم و همچنین هشت حفره‌ای که در گوشه‌های حلقه دوم و سوم جای گرفته‌اند d_3 و ثابت شبکه در این ساختار Λ است. ۱۰۴
شکل ۵-۳۱: اثر تغییر d_1 بر نمودار پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی با Λ = 2 µm ، d_2=1.2 µm و d_3=1.76 µm ۱۰۵
شکل ۵-۳۲: اثر تغییر d_1 بر نمودار تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی با Λ = 2 µm ، d_2=1.2 µm و d_3=1.76 µm ۱۰۵
شکل ۵-۳۳: اثر تغییر Λ بر نمودار پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی با d_1=0.34 µm، d_2=1.2 µm، d_3=1.76 µm ۱۰۶
شکل ۵-۳۴: اثر تغییر Λ بر نمودار تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی با d_1=0.34 µm، d_2=1.2 µm، d_3=1.76 µm ۱۰۶

شکل ۵-۳۵: اثر تغییر d_2 بر نمودار پاشیدگی PCF با مشخصات Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_3=1.76 µm ۱۰۷
شکل ۵-۳۶: اثر تغییر d_2 بر نمودار تلفات تحدید PCF با مشخصات Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_3=1.76 µm ۱۰۷
شکل ۵-۳۷: اثر تغییر قطر حفره‌های هوا با ثابت نگه داشتن نسبت $\frac{d}{\Lambda}$ها ($\frac{d_1}{\Lambda}=0.16$، $\frac{d_2}{\Lambda}=0.75$ و $\frac{d_3}{\Lambda}=0.83$) بر الف) منحنی پاشیدگی ب) منحنی تلفات تحدید. ۱۰۸
شکل ۵-۳۸: سطح مقطع فیبر کریستال فوتونی شبکه مثلثی با ساختار و پارامترهای مشابه با فیبر شبکه مربعی پیشنهادی در شکل ۵-۲۶. ..... ۱۰۹
شکل ۵-۳۹: مقایسه بین منحنی‌های پاشیدگی فیبرهای کریستال فوتونی مشابه با ساختار شبکه مثلثی و مربعی با مشخصات Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_2=1.6µm، d_3=1.76µm و N=5. ۱۰۹
شکل ۵-۴۰: مقایسه بین منحنی‌های تلفات تحدید فیبرهای کریستال فوتونی مشابه با ساختار شبکه مثلثی و مربعی با Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_2=1.6 µm، d_3=1.76 µm و N=5. ..... ۱۱۰
شکل ۵-۴۱: توزیع میدان مود برای فیبر کریستال فوتونی با الف) ساختار شبکه مثلثی و ب) ساختار شبکه مربعی در طول موج 1.55 µm. ۱۱۰
شکل ۵-۴۲: رفتار پاشیدگی فیبرکریستال فوتونی شبکه مربعی با مشخصات Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_2=1.6 µm، d_3=1.76 µm، 5 و N= 4 ..... ۱۱۱
شکل ۵-۴۳: رفتار تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی شبکه مربعی با مشخصات Λ =2.112 µm، d_1=0.34 µm، d_2=1.6 µm، d_3=1.76 µm، 5 و N= 4 ..... ۱۱۱
شکل ۵-۴۴: فیبرکریستال فوتونی پیشنهادی با قطر حفره‌های حلقه اول d_1، حلقه دوم d_2 و حلقه سوم، چهارم و پنجم d_3. حفره ناحیه مغزی d_c وضریب شکست آن 1.43 است. در حلقه اول چهار حفره‌ی روی قطرهای عمودی و افقی فیبر دارای ضریب شکست 1.43 هستند. ۱۱۲
شکل ۵-۴۵: تغییرات منحنی پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی با d_1=0.44µm, d_2=0.6 µm d_3=1.4 µm و Λ=2.3 µm برای 1.7µm، 1.6، 1.5 و d_c=1.4 ..... ۱۱۳
شکل ۵-۴۶: تغییرات تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی با d_1=0.44µm, d_2=0.6 µm, d_3=1.4 µm و Λ=2.3 µm برای 1.7µm، 1.6، 1.5 و d_c=1.4. ..... ۱۱۴
شکل ۵-۴۷: تغییرات منحنی پاشیدگی فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی با Λ=2.3 µm، d_c=1.5µm، d_2=0.6µm، d_3=1.4µm به ازای d_1 های مختلف. ۱۱۴
شکل ۵-۴۸: تغییرات نمودار تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی پیشنهادی با Λ=2.3 µm، d_c=1.5µm، d_2=0.6µm، d_3=1.4µm به ازای d_1 های مختلف ۱۱۵
شکل ۵-۴۹: تغییرات منحنی پاشیدگی برای فیبر کریستال فوتونی با Λ=2.3µm، d_1=0.48µm و d_3=d_c=1.5µm، به‌ازای مقادیر مختلف d_2 ..... ۱۱۵
شکل ۵-۵۰: تغییرات نمودار تلفات تحدید فیبر کریستال فوتونی با Λ=2.3µm، d_1=0. 48µm و d_3=dc=1.5µm، به ازای مقادیر مختلف d_2. ..... ۱۱۶

پیش‌گفتار

با توسعه صنعت، نیاز به سیستم‌های ارتباطی سرعت بالا با تلفات پایین ضروری است. در دو دهه گذشته با به‌کارگیری فیبرهای نوری، ارسال اطلاعات با سرعت بالا به فواصل دورتری میسر شده است. اما فیبرهای نوری مشکلاتی نظیر تلفات، اثرات غیرخطی و از همه مهم‌تر پاشیدگی دارند.

در پی حل این مشکلات، نسل جدیدی از فیبرها به‌نام فیبرهای کریستال فوتونی ساخته شدند که در مقایسه با فیبرهای نوری معمولی، خصوصیات جالب و منحصربه‌فردی را از خود نشان می‌دهند.

با وجود فیبرهای کریستال فوتونی تحول عمیقی در مخابرات به وجود می‌آید، چرا که کریستال‌ها از قطعات الکترونیکی کوچک‌تر هستند و تجهیزات به طور فزاینده کوچک‌تر و ارزان‌تر خواهند شد و در ضمن کارایی آن‌ها بالاتر می‌رود. قطعات و تجهیزات مبتنی بر کریستال‌های فوتونی، مقاوم‌تر بوده و کم‌تر نسبت به تابش الکترومغناطیس آسیب‌پذیر هستند. در خطوط انتقال مخابراتی، ناگزیر در برخی نقاط خمش‌هایی وجود دارد. با وجود استفاده از فیبر نوری در این نقاط تلفات خمش بالایی پدید می‌آید. اما فیبرهای کریستال فوتونی دارای تلفات کم، نه تنها در مسیر مستقیم بلکه در خمش‌های تیز هستند.

ساخت اولین فیبر کریستال فوتونی، توسط راسل و همکارانش در سال ۱۹۹۵ به ثبت رسید. اما این فیبر از نوع مغزی جامد بود. در نهایت در سال ۱۹۹۹، راسل و همکارانش، توانستند فیبری تک‌مود با مغزی هوا بسازند که به‌وسیله شکاف باند فوتونی کریستال دو بعدی، نور را به دام می‌انداخت و آن را هدایت می‌کرد. از آن پس تحقیقات زیادی بر روی این فیبرها انجام شده تا بتوان در کاربردهای گوناگون، بهترین خصوصیات را از خود نشان دهند.

یافتن طرحی مناسب از فیبر کریستال فوتونی به نحوی که در حین داشتن پاشیدگی صفر تخت بتوان نور را با درصد بالایی در مغزی حبس کرد، کمک بزرگی به خطوط انتقال مخابراتی می‌کند. در این پروژه هدف اصلی طراحی و شبیه‌سازی یک فیبر کریستال فوتونی با پاشیدگی تخت پایین و تلفات تحدید اندک است.

از آن‌جایی که ساختار فیبرهای کریستال فوتونی بر پایه کریستال‌های فوتونی دو بعدی است؛ در فصل اول به‌طور مختصر انواع ساختار کریستال فوتونی و سازوکار هدایت آن‌ها بیان می‌شود. در ادامه خصوصیات کریستال‌های فوتونی و کاربردهای درون شکاف و خارج شکاف باند فوتونی آن‌ها ذکر می‌شود.

در فصل دوم، ابتدا تاریخچه ساخت فیبرهای کریستال فوتونی و انواع آن‌ها شرح داده می‌شود. سپس خصوصیات مهم این فیبرها توضیح داده می‌شود. در ادامه روش ساخت فیبرهای کریستال فوتونی و مشکل‌هایی که در حین ساخت آن‌ها به وجود می‌آید ذکر می‌شود.

برای تحلیل فیبرهای کریستال فوتونی، روش‌های مختلفی وجود دارد. در فصل سوم این روش‌ها را نام برده و موارد مهم‌تر آن‌ها، همراه معایب و مزایای‌شان شرح داده می‌شود. در انتها، روش‌های تحلیلی بیان شده با هم مقایسه می‌شوند.

تاکنون گزارش‌های زیادی در مورد خصوصیات پاشیدگی و تلفات تحدید فیبرهای کریستال فوتونی انتشار یافته است. در فصل چهارم تعدادی از این مقالات که ساختارهای ارائه شده در آن‌ها با یکدیگر متفاوت است، برای نمونه آورده می‌شود.

در فصل پنجم چهار ساختار مختلف فیبر کریستال فوتونی مغزی جامد، که طراحی و شبیه‌سازی شده، آورده می‌شود. این طرح‌ها شامل فیبر با مغزی واحد و ناحیه موثر مودی کوچک، فیبر با ناحیه موثر مودی بزرگ، فیبر با ساختار شبکه مربعی و فیبر هشت ضلعی است. برای این فیبرهای طراحی-شده، اثر پارامترهای ساختاری فیبر بر خصوصیات پاشیدگی و تلفات تحدید بررسی می‌شود. در ضمن برای طراحی‌های پیشنهادی دوم و سوم، اثر خطای ساخت پارامترهای ساختاری فیبر بر منحنی پاشیدگی و تلفات تحدید شبیه‌سازی می‌شود.

فصل اول

مبانی ساختارهای کریستال فوتونی