



دانشگاه اراک

دانشکده علوم پایه

کارشناسی ارشد فیزیک گرایش اتمی و مولکولی

بررسی پایداری و حساسیت چشمه و گیرنده و انواع اتلاف

در فیبرهای نوری

پژوهشگر

راضیه سلگی

اساتید راهنما

دکتر اکبر زنده نام

دکتر محمود میرزایی

استاد مشاور

مهندس محمود نوروزی

زمستان ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادرم

اولین معلمان عشق، محبت و ایثار

که استواری و امداد آنهاست و از جدیت و پشتکار آنها به مفهوم سنگینت انعطاف رسیدم و به پای نگاه و تجربه شان تا افق های

دور رفتم و آنچه از آنان آموختم از عیان بود و نه از بیان، و به مدد این آموزگاران دانستم که بهترین در زندگانییم چگونه معنا

می شود...

پروردگار... پ

روزی اهل روزگار؛ در این روز و حر روزگار از جانب تو به دست روزی رسان و روزی دهنده تو بوده است، من، آدمی، روزی از تو می گیرم و شکر کرده و ناکرده روزگار می گذرانم بی آنکه بیندیشم عظمت و قدرت و اقدار ابدی تو را که این گونه، این گونه به قدرت و اقدار، این خلق، بشمار را به شماره و اندازه بی کم و کاست روزی می دهی و کم یا زیاد، روزگار می گذرانند.

و خداوند...

ای کاش علاوه بر این رزق و این روزی حیات، بخش و جان، بخش، ذره ای از اندیشه و معرفت روزی ام باشد، هر چند که آن هم روزی ام کرده ای، و ای کاش آگاهی و درک آن رزق جانم شود، تا بیندیشم و شکر کنم بزرگی و عظمت تو را، که روزی رسانی و رزق دهی تنها یکی از هزار نشانه ای خداوندی و عظمت تو است.

پروردگار...

گاهی که اندکی معرفت و اندیشه می یابم تا چشمم باز کنم و قدرت و اقدار تو را بینم، باری بیشتر پی می برم به اندکی شکرم در برابر بسیاری روزی و معرفت و اندیشه و دیگر نعمت یاست، و دیگر چه نخواهم آنگاه جز آنکه عفو و آمرزش روزی ام کنی و بخشایی مرا؛ همیشه و بهاره...
همتم بدرقه راه کن ای طایر قدس
که دراز است ره مقصد و من نوسفرم

پاسکاری

اگرچه قلم و زبان از ادای حق پاس و قدردانی نسبت به خادمان و متولیان عرصه علم و معرفت ناتوان است ولی این ابراز تشکر،

کمترین وظیفه کسی است که خود را تا ابد مدیون به این بزرگان می‌داند. لذا وظیفه خود می‌دانم که مراتب پاس و قدردانی خود را به ساحت

تامی استادان و تلامذگان عرصه علم و دانش تقدیم کنم، بویژه

استاد فرزانه جناب آقای دکتر کبر زنده نام که بهواره باروینی باز و گشاده پانگنوی سوالات و مشکلات این رساله بوده اند و در راه کسب علم

و معرفت از آنچه در توان داشتند دریغ نکردند

و استاد گرامی جناب آقای دکتر محمود میرزایی که نا بهواری های این مسیر بارهانی های ایشان بهوار گشتند

و مهندس محمود نوروزی که مشاوره این پروژه را بر عهده داشتند.

در اینجا از استاد برجند دکتر بشین فرخی که افتخار ساگردی ایشان در دوران تحصیل را داشتم تشکر می‌کنم که مشوق راه دانشم بودند و خردمندانه

درس زندگی و چگونه زیستن را به من آموختند.

از استاد گرامی دکتر مهدی میرزایی که زحمت داوری این رساله را بر عهده داشتند صمیمانه تشکر می‌کنم.

چکیده

رساله حاضر شامل ۴ فصل می‌باشد. فصل اول، به توصیف ویژگی‌های منحصر بفرد فیبرهای کریستال فوتونی می‌پردازد. از بررسی خصوصیات کریستال‌های فوتونی، که موادی با توزیع متناوب ضریب شکست هستند، و گذری بر فیبرهای نوری معمولی تا فیبرهای کریستال فوتونی آغاز شده، و با توصیف دو سازوکار انتشار نور در فیبرهای کریستال فوتونی که شامل بازتاب کلی داخلی و شکاف باند فوتونی می‌باشند، ادامه می‌یابد.

در فصل دوم، انواع اتلاف برای هر دو دسته فیبرهای کریستال فوتونی، فیبرهای هسته پر و هسته تهی، معرفی شده‌اند. همچنین در این فصل به نتایج بررسی‌های محققین پرداخته شده است.

علیرغم روش‌های عددی مختلفی که در بررسی فیبرهای کریستال فوتونی بکار گرفته شده‌اند، روش اجزای محدود به علت دقت بسیار بالای آن همواره مورد توجه بوده است. به همین منظور در رساله حاضر به بررسی فیبرهای کریستال فوتونی با روش اجزای محدود پرداخته شده، که فصل سوم شامل ارائه معرفی مختصری از روش اجزای محدود می‌باشد.

در فصل پایانی نیز به محاسبه و بررسی اتلاف حبسی و پراکندگی سرعت گروه برای دو نوع فیبر کریستال فوتونی با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده، همچنین اثر کسر پرشدگی هوا و تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا بر ضریب شکست مؤثر و پراکندگی سرعت گروه، مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول

اساس فیبرهای کریستال فوتونی

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ از فیبرهای نوری معمولی تا فیبرهای کریستال فوتونی ۴
- ۳-۱ سازوکار انتشار ۸
- ۱-۳-۱ بازتاب کلی داخلی تعدیل شده ۸
- ۲-۳-۱ بازتاب کلی داخلی تعدیل شده ۱۰
- ۴-۱ ویژگی ها و کاربردها ۱۲
- ۱-۴-۱ فیبرهای هسته پر ۱۳
- ۲-۴-۱ فیبرهای هسته تهی ۲۰

فصل دوم

پارامترهای فیبر و مروری بر تحقیقات گذشته

- ۱-۲ اتلاف ذاتی ۲۳
- ۱-۱-۲ فیبرهای هسته پر ۲۳
- ۲-۱-۲ فیبرهای هسته تهی ۲۵
- ۲-۲ اتلاف حبسی ۳۲
- ۳-۲ اتلاف خمشی ۳۶

فصل سوم

مروری بر روش اجزای محدود

۴۲	۱-۳ مقدمه‌ای بر فرمول بندی FEM.....
۴۲	۲-۳ مروری بر FEM برداری.....
۴۳	۳-۳ فرمول بندی FEM برداری برای تحلیل مدی موجبر.....
۴۸	۴-۳ شار توان در موجبر.....
۴۹	۵-۳ اختلال غیر خطی و ویژه مدهای موجبر نوری.....
۵۰	۶-۳ بررسی اعتبار کد FEM توسعه یافته.....
۵۰	۷-۳ شبکه بندی برای تحلیل FEM.....

فصل چهارم

تحقیقات انجام شده و نتایج حاصل از بررسی ها

۵۳	۱-۴ مقدمه.....
۵۳	۲-۴ فرمول بندی اتلاف حبسی و پراکندگی سرعت گروه.....
۵۴	۳-۴ فیبر نوری با حفره هوای کمکی.....
۵۹	۴-۴ فیبر حفره‌دار.....
۶۳	۵-۴ بررسی اثر کسر پرشدگی هوا بر GVD.....
۶۶	۶-۴ مطالعه تأثیر تعداد حلقه حفره‌های هوا بر GVD.....
۷۰	نتیجه گیری و چشم اندازی به آینده.....
۷۱	منابع.....

صفحه چکیده و صفحه عنوان به زبان انگلیسی

فهرست تصاویر

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: نمایی از سطح مقطع اولین فیبر کریستال فوتونی هسته پر، با قطر حفره‌های هوای 300 nm و فاصله بین حفره‌های $2.3\text{ }\mu\text{m}$ [۳]. ۷
- شکل ۱-۲: نمایی از سطح مقطع اولین PCF هسته تهی، با فاصله بین حفره‌های $4.9\text{ }\mu\text{m}$ و قطر هسته $14.8\text{ }\mu\text{m}$ [۴]. ۷
- شکل ۱-۳: (الف) شکل ظاهری یک PCF هسته جامد با شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا که نور در آن توسط بازتاب کلی داخلی منتشر می‌شود (ب) تصویر میکروسکوپی از یک PCF مثلثی هسته جامد ساخته شده، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۹
- شکل ۱-۴: (الف) شکل ظاهری یک PCF هسته جامد با شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا که نور را از طریق اثر شکاف باند فوتونی عبور می‌دهد (ب) تصویر میکروسکوپی از یک PCF مثلثی هسته تهی ساخته شده، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۱۱
- شکل ۱-۵: نمایی از سطح مقطع اولین PCF شکاف باند فوتونی با شبکه لانه زنبوری از حفره‌های هوا [۷]. ۱۲
- شکل ۱-۶: نمایی از سطح مقطع فیبرهای دوشکستی پاپیون و پاندا. ۱۴
- شکل ۱-۷: تصویر میکروسکوپی از (الف) سطح مقطع و (ب) ناحیه هسته از یک PCF مثلثی دوشکستی، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۱۴
- شکل ۱-۸: تصویر میکروسکوپی از (الف) سطح مقطع و (ب) ناحیه هسته از یک PCF غیرخطی بالا، که با هسته سیلیکا کوچک و حفره‌های هوای بزرگ مشخص شده، بانتقال طول موج با پراکندگی صفر به ناحیه مرئی، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۱۵
- شکل ۱-۹: نمایی از سطح مقطع (الف) یک فیبر با دو غلاف با ضریب شکست پله‌ای، (ب) یک PCF با غلافی شامل حفره‌های هوا، که هسته فعال تک مد در ساختار یک LMA جاسازی شده است. ۱۸

- شکل ۱-۱۰: تصویر میکروسکوپی از سطح مقطع سه PCF مختلف، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۱۹.....
- شکل ۱-۲: تغییرات اتلاف نوری در طی سال‌های اخیر تا سال ۲۰۰۶ برای PCF‌های هسته جامد (علامت +) و هسته تهی (علامت ×). ۲۵.....
- شکل ۲-۲: رفتار میرایی بر حسب طول موج برای PCF‌های ۷ سلولی و ۱۹ سلولی مد سطح مقطع آنها نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپی فیبرهای هسته تهی توسط Crystal Fiber A/S تهیه شده اند. ۲۷.....
- شکل ۲-۳: تصویر میکروسکوپی یک فیبر با هسته تهی ۱۹ سلولی، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/S. ۲۷.....
- شکل ۲-۴: برون یابی حداقل میرایی، PCF هسته تهی واقعی با $1.2 \frac{dB}{km}$ در $1620nm$ و بهینه شده با اتلاف $0.2 \frac{dB}{km}$ در $1620nm$ [۱۴]. ۲۹.....
- شکل ۲-۵: مثالی از منحنی پراکندگی یک PCF هسته تهی با تقاطع بازدارنده بین مد اصلی و یک مد سطحی. ۳۲.....
- شکل ۲-۶: اتلاف حبسی بر حسب طول موج برای PCF پیشنهاد شده در [۱۵]. ۳۳.....
- شکل ۲-۷: اتلاف حبسی در $1550nm$ (الف) به عنوان تابعی از قطر حفره‌ها d بهنجار شده با گام $\Lambda = 2.3\mu m$ برای تعداد حلقه‌های مختلف و (ب) به عنوان تابعی از گام Λ برای $\frac{d}{\Lambda}$ کسر پرشدگی هوای مختلف [۱۶]. ۳۴.....
- شکل ۲-۸: اتلاف حبسی بر حسب طول موج λ برای تعداد مختلف حلقه، $\frac{d}{\Lambda} = 0.5$ و (الف) $\Lambda_{\square} = 2.3\mu m$ و (ب) $\Lambda_{\square} = 4.6\mu m$ [۱۶]. ۳۵.....
- شکل ۲-۹: اتلاف حبسی بر حسب طول موج در یک PCF مثلثی هسته تهی با ۴ و ۷ حلقه حفره‌های هوا. ۳۶.....
- شکل ۳-۱: موجبری با شکل دلخواه با دیوار الکتریکی. ۴۳.....
- شکل ۳-۲: (الف) اجزای لبه مماسی (ب) اجزای نقطه‌ای. ۴۶.....

شکل ۴-۱: (الف) نمایی از یک AHAOF، (ب) شبکه بندی FEM برای پنجره محاسباتی فیبر	۵۴
قسمت الف.	۵۴
شکل ۴-۲: نمایه میدان مغناطیسی مد اصلی برای AHAOF (الف) در دوبره، (ب) در سه بعد.	۵۵
.....	۵۵
شکل ۴-۳: تغییرات ضریب شکست فیبر AHAOF بر حسب طول موج.	۵۶
.....	۵۶
شکل ۴-۴: تغییرات ضریب شکست بر حسب $1/\lambda^2$ برای AHAOF.	۵۷
.....	۵۷
شکل ۴-۵: تغییرات تلفات حبسی بر حسب طول موج.	۵۷
.....	۵۷
شکل ۴-۶: تغییرات GVD بر حسب طول موج با استفاده از FEM و مقایسه آن با سایر روش-	۵۸
ها.	۵۸
شکل ۴-۷: (الف) نمایی از فیبر حفره دار مورد مطالعه، (ب) سطح مقطع شبکه بندی شده در	۵۹
FEM.	۵۹
شکل ۴-۸: نمایه میدان مغناطیسی مد اصلی برای HF.	۶۰
.....	۶۰
شکل ۴-۹: تغییرات ضریب شکست HF بر حسب طول موج.	۶۰
.....	۶۰
شکل ۴-۱۰: تغییرات ضریب شکست مؤثر بر حسب $1/\lambda^2$ برای HF.	۶۱
.....	۶۱
شکل ۴-۱۱: اتلاف حبسی محاسبه شده بر حسب طول موج برای HF.	۶۲
.....	۶۲
شکل ۴-۱۲: تغییرات GVD بر حسب طول موج با استفاده از FEM و مقایسه آن با سایر	۶۲
روش‌ها برای HF.	۶۲
.....	۶۲
شکل ۴-۱۳: (الف) نمایی از سطح مقطع یک HF با یک حلقه حفره هوا، (ب) میدان	۶۴
مغناطیسی مد اصلی مربوط به HF قسمت الف.	۶۴
.....	۶۴
شکل ۴-۱۴: تغییرات ضریب شکست مؤثر HF بر حسب طول موج برای کسر پراشده‌گی هوای	۶۵
مختلف $d/\Lambda = 0.2-1$	۶۵
.....	۶۵
شکل ۴-۱۵: GVD محاسبه شده برای HF بر حسب طول موج برای کسر پراشده‌گی هوا	۶۵
مختلف.	۶۵
.....	۶۵

شکل ۴-۱۶: (الف) نمایی از سطح مقطع یک HF با $d/\Lambda = 0.4$ و $\Lambda = 2.3\mu m$ و و ضریب شکست سیلیکا غلاف ۱.۴۲ و تعداد چهار حلقه حفره هوا، (ب) شبکه بندی مثلثی FEM... ۶۶
شکل ۴-۱۷: نمایه میدان مغناطیسی مد اصلی فیبر شکل ۴-۱۶. ۶۷.....
شکل ۴-۱۸: تغییرات ضریب شکست مؤثر HF با $d/\Lambda = 0.4$ بر حسب طول موج برای تعداد مختلف حلقه‌های حفره‌های هوا. ۶۸.....
شکل ۴-۱۹: تغییرات GVD بر حسب طول موج برای HF با تعداد حلقه‌های حفره‌های هوا مختلف. ۶۹.....

فصل اول

اساس فیبرهای کریستال فوتونی

۱-۱ مقدمه

تا به حال، یک فیبر نوری یک رشته باریک جامد بود که توسط ماده‌ای دیگر با ضریب شکست پایین‌تر احاطه شده بود. امروزه فیبرهای کریستال فوتونی (PCF: Photonic Crystal Fiber) به عنوان تکنولوژی دیگر فیبرهای نوری، مورد توجه قرار گرفته‌اند. PCF ها که برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ معرفی شده‌اند، فیبرهای نوری با ساختار متناوب منظم از مواد با ضریب شکست پایین در ماده‌ای به عنوان زمینه با ضریب شکست بالاتر، هستند. معمولاً ماده‌ای که در زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد سیلیکای بدون ناخالصی است و عموماً بخش‌های با ضریب شکست پایین حفره‌های هوایی هستند که در تمام طول فیبر کشیده شده‌اند.

PCF ها شامل دو دسته اصلی هستند، فیبرهای ضریب شکستی و فیبرهای شکاف باند فوتونی. در PCF های مربوط به دسته اول، به دلیل اینکه نور با استفاده از مکانیسم بازتاب کلی داخلی تعدیل شده (modified) در هسته پرمیتر می‌شود، این دسته از فیبرها به فیبرهای نوری معمولی شبیه هستند. در واقع، اختلاف بین ضریب شکست هسته و غلاف کریستال فوتونی مقداری مثبت دارد، که حضور حفره‌های هوا در غلاف باعث کاهش ضریب شکست شده است. اگر توجه شود، مکانیسم هدایت با واژه "تعدیل شده" بیان شد چرا که ضریب شکست غلاف مانند فیبرهای معمولی استاندارد ثابت نیست، بلکه با طول موج تغییر می‌کند.

این ویژگی‌ها، و همچنین تقابل (contrast) ضریب شکست بالا بین هوا و سیلیکا، ویژگی‌های جدید منحصر به فردی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، یکی از خصوصیات ویژه PCF ها انعطاف پذیری در مقابل طراحی‌های مختلف است. با ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های هندسی حفره‌های هوا در سطح مقطع فیبر، نظیر تغییر در مکان یا ابعاد آن‌ها، فیبرهایی با خصوصیات کاملاً متضادی حاصل می‌شوند. به عنوان مثال، PCF های با هسته سیلیکا کوچک، حفره‌های هوای بزرگ، که منجر به کسر پراشده‌گی هوا (نسبت قطر حفره‌های هوا به فاصله بین آنها) بیشتری می‌شود، در مقایسه با فیبرهای نوری معمولی ویژگی‌های غیر خطی بهتری از خود نشان می‌-

دهند، به همین دلیل در بسیاری از ابزار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل فیبرها را می‌توان با حفره‌های هوای کوچک و فاصله حفره به حفره بزرگ به منظور دستیابی به ناحیه مدی بزرگ (Large Modal Area) طراحی کرد، که این قبیل فیبرها برای انتقال توان‌های بالا مناسب‌اند. بر خلاف فیبرهای معمولی، PCF ها می‌توانند تحت شرایط هندسی خاصی به صورت نامحدود تک مد باشند که البته این شرایط برای هر طول موجی برقرار است و مد منتشر شده، مد اصلی است. شرایط پراکندگی PCF با انعطاف بالایی قابل تنظیم است، به این صورت که می‌توان، طول موج با پراکندگی صفر را به ناحیه مرئی منتقل کرد و همچنین می‌توان منحنی‌های فوق مسطح (ultraflattened) (در گستره طول موجی زیاد) و یا منحنی‌های با شیب منفی برای پراکندگی بدست آورد.

وقتی که هسته PCF، ضریب شکستی کمتر از غلاف کریستال فوتونی دارد، نور با مکانیسمی متفاوت از بازتاب کلی داخلی منتشر می‌شود. در واقع حفره‌های هوا ساختار ریز که غلاف PCF را تشکیل می‌دهند، یک کریستال است، که کریستال فوتونی ماده‌ای است با ترکیب دی-الکتریک متناوب که با شکاف باند فوتونی (PBG: Photonic Band Gap) مشخص می‌شود که شکاف باند فوتونی نیز جایی است که نور در محدوده طول موجی خاصی می‌تواند منتشر شود. PBG را در طبیعت هم می‌توان یافت، به عنوان مثال، رنگ‌های روشن و زیبای بال پروانه. PCF های با هسته با ضریب شکست پایین را می‌توان با در نظر گرفتن یک نقص در ساختار کریستال فوتونی توجیه کرد، به عنوان مثال، یک حفره هوای اضافی و یا حتی بزرگ‌تر می‌تواند به عنوان نقص در نظر گرفته شود، همچنین به دلیل اینکه PBG انتشار نور در غلاف ساختار ریز را ممکن می‌سازد، نور حبس می‌شود. این مکانیسم انتشار را نمی‌توان در فیبرهای نوری معمولی یافت و رویکرد جدیدی را به سوی کاربردهای شگفت انگیز باز می‌کند.

در PCF ها نور می‌تواند در هوا منتشر شود، که این خود کاربردهای بیشمار شگفت انگیزی را فراهم می‌کند، مثل انتشار با اتلاف پایین و انتقال توان‌های بالا بدون آنکه فیبر محتمل هرگونه آسیبی شود. بعلاوه، PCF های توخالی نسبت به خمش، حتی در شعاع‌های خمش کوچک،

غیرحساس اند و وجود ویژگی‌های پراکندگی مفرط آنها با تغییر در ساختار موجبر قابل کنترل است. در نهایت وقتی حفره‌ها با مایعات یا گازهای مناسب پر شوند، PCF های هسته تهی را به خوبی می‌توان در سنسورها یا برای اپتیک غیرخطی به کار برد.

۲-۱ از فیبرهای نوری معمولی تا فیبرهای کریستال فوتونی

فیبر نوری یکی از مهمترین پیشرفت‌های تکنولوژی در قرن بیستم است، که این تکنولوژی قادر به انتقال اطلاعات به شکل پالس‌های نوری کوتاه در طی فاصله‌های طولانی با سرعت بالا است. این تکنولوژی با سرعتی باورنکردنی، از اولین موجبر تک مد با اتلاف پایین در سال ۱۹۷۰ تا شبکه‌های سراسری پیچیده مخابراتی، توسعه یافته است. همچنین فیبرهای نوری کاربردهای غیرمخابراتی از قبیل انتقال پرتو در پزشکی، ماشین‌کاری (machining)، تشخیص و دریافت سیگنال و تعداد زیادی کاربردهای دیگر، دارند. فیبرهای نوری جدید به خوبی ویژگی‌هایی از قبیل: اتلاف‌های نوری، ویژگی‌های غیرخطی نوری، پراکندگی سرعت گروه و اثرات قطبش را تحت کنترل قرار می‌دهند. پس از سال‌ها تحقیقات متمرکز، توانایی‌های سیستم و تکنولوژی‌های ساخت بهبود یافته و مسیر توسعه تا حد ممکن پیش رفت.

در دهه ۱۹۸۰ امکان ساخت موادی در ابعاد طول موج نوری، در حدود میکرومتر یا کمتر، به منظور گسترش واسطه نوری جدید که به کریستال‌های فوتونی معروف‌اند، توجه محققان و مهندسان در آزمایشگاه‌های مختلف را به خود جلب کرد. کریستال‌های فوتونی از قرار گرفتن ساختارهای ریز هم شکل منظمی در یک ماده تشکیل می‌شوند که ویژگی‌های نوری آنها متغیر است [۱]. در واقع کریستال‌های فوتونی بر پایه تحقیقات صورت گرفته در زمینه نیمه هادی‌ها پیش رفته‌اند. ساختار باند در نیمه هادی‌ها نتیجه واکنش بین الکترون‌ها و پتانسیل‌های متناوب شبکه کریستالی است. با حل معادله موج شرودینگر برای یک پتانسیل متناوب، حالت‌های انرژی الکترون که توسط باندهای ممنوعه از هم جدا شده‌اند، به دست می‌آیند. PBG های

در کریستال‌های فوتونی را می‌توان با جایگذاری متغیرهای متناوب ثابت دی‌الکتریک که همان متغیرهای متناوب ضریب شکست هستند در پتانسیل الکتریکی و همچنین جایگزینی معادله موج کلاسیکی برای میدان مغناطیسی با معادله شرودینگر بدست آورد [۲].

PBG در سال ۱۹۸۷ توسط سیجیو جان (Sajeev John) از دانشگاه تورنتو (Toronto) و الی یابلونوویچ (Eli Yablononitch) از مرکز تحقیقات مخابراتی بل (Bell) پیشینی شد، که به عنوان مهمترین رویداد در حوزه اپتیک در دهه نود تبدیل شد. ایده مطرح شده این بود که می‌توان ساختارهایی را طراحی کرد که بصورت گزینشی انتشار فوتون‌ها با سطوح انرژی مختلف، همان طول موج‌ها، را قطع کرد در صورتی که سایر طول موج‌ها به راحتی اجازه عبور داشته باشند که این پدیده متناظر با PBG ها است. علاوه بر این، تغییرات کوچکی در تناوب ضریب شکست، منجر به ایجاد سطوح جدید انرژی در PBG خواهد شد، همانطور که منجر به ایجاد سطوح انرژی در شکاف باند نیمه رساناهای معمولی می‌شود.

متأسفانه ثابت شده است که ساخت چنین ساختارهایی فوق العاده مشکل است. اولین ماده PBG در سال ۱۹۹۱ توسط یابلونوویچ و همکارانش با مته زدن حفره‌هایی به قطر ۱mm در یک بلوک از ماده‌ای با ضریب شکست ۳.۶ ساخته شد. از آنجاییکه طول موج شکاف باند از مرتبه بین حفره‌های هوا در کریستال فوتونی است، این ساختار شکاف بانندی در محدوده مایکروویو دارد.

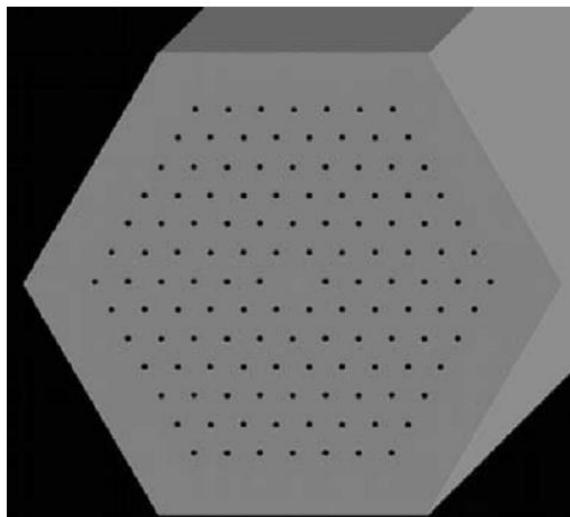
در ۱۹۹۱، فیلیپ راشل (Philip Russell) که تحقیقات یابلونوویچ او را حیرت زده کرده بود، در طی کنفرانس CLEO/QELS^۱ ایده‌ای را مطرح کرد [۲]. ایده‌ی راشل این بود که نور را می‌توان درون یک فیبر هسته تهی با ایجاد یک کریستال فوتونی دو بعدی در غلاف فیبر به دام انداخت، که این کریستال فوتونی یک شبکه توری متناوب از حفره‌های هوای میکروسکوپی در حد طول موج، در شیشه است. مانند منبع رنگ در بال‌های پروانه و پروبال طاووس، که آنها ساختارهای متناوبی از مرتبه طول موج هستند که دسته‌ای از رنگ و زاویه را در معرض نمایش می‌گذارند، و باند توقف جایی است که نور به طور کامل بازتاب می‌کند. وقتی که سطح مقطع

فیبر به طور مناسبی طراحی شد، غلاف کریستال فوتونی در امتداد طول فیبر ادامه پیدا می-کند، که این منجر به جلوگیری از فرار نور از هسته تهی می-شود. این نسل جدید از فیبرها PCF نامیده می-شوند، که بر ویژگی‌های خاص مواد کریستال فوتونی تکیه می-کند.

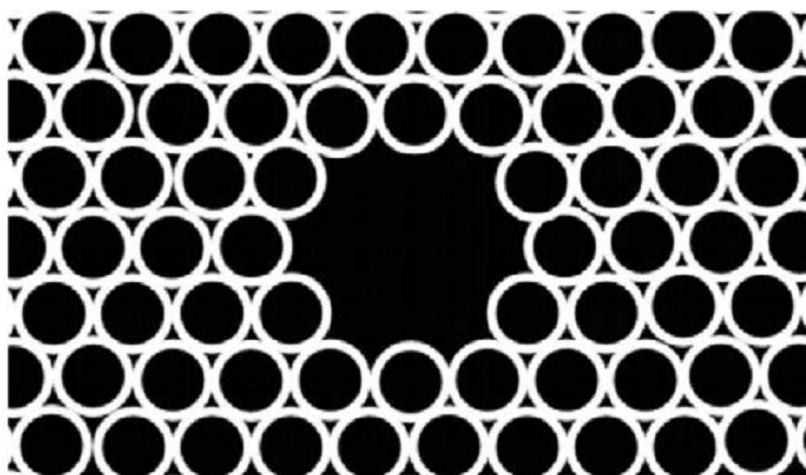
اولین فیبر با ساختار کریستال فوتونی در سال ۱۹۹۵ توسط راشل و همکارانش گزارش شد [۳]. اگر چه تحقیقات گذشته بسیار حیرت انگیز بودند، ولی اولین PCF همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده هسته تهی نداشت و بر خلاف تحقیقات صورت گرفته این ساختار برای حبس کردن نور تأکیدی روی پدیده شکاف باند فوتونی ندارد.

در حقیقت گروه راشل در سال ۱۹۹۵ توانست فیبری با شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا را بسازد، اما سایز حفره‌ها برای دستیابی به کسر پرشدگی هوای زیاد کوچک بود که کسر پرشدگی هوا زیاد برای رسیدن به PBG نیاز است. محاسبات نشان دادند که این فیبر هسته جامد یک موجبر تک مد در بازه وسیعی از طول موج را تشکیل داده که مد منتشره، مد اصلی است. به علاوه، به علت حضور عناصر ناخالصی در هسته، اولین PCF ساخته شده میزان اتلاف ذاتی پایینی داشت و یک هسته سیلیکا با ابعادی حدود ۱۰ برابر هسته فیبر تک مد معمولی (SMF: Single Mode Fiber) افزایش توان عبور نوری متناسب با ابعاد هسته را به دنبال دارد. بعد از انتقال این گروه تحقیقاتی به دانشگاه بث (Bath) در سال ۱۹۹۶، جایی که روش‌های ساخت PCF به روز شده بود، راشل و همکارانش توانستند اولین فیبر هسته تهی تک مد را در سال ۱۹۹۹ بسازند، که در این فیبر نور به علت یک PBG دو بعدی حبس شد که نمایی از این فیبر در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. آنها دریافتند که مکانیسم انتشار شکاف باند فوتونی قدرتمند عمل می‌کند بطوریکه حتی اگر فیبر تحت خمش قرار گیرد، نور به خوبی در هسته تهی حبس می‌شود. به هر حال این ویژگی به تغییرات کوچک در هندسه فیبر وابسته است، مثلاً تغییراتی در اندازه حفره‌های هوا. روش‌های اولیه تولید به گونه‌ای بودند که به منظور تکمیل تحقیقات پایه، تنها طول کوتاهی از فیبر قابل تولید بود، اما اکنون تیم‌های تحقیقاتی

زیادی به منظور بهینه سازی روش های تولید PCF به شدت کار می کنند، که این تحقیقات به منظور افزایش طول فیبر و کاهش اتلاف آن گسترش یافته اند.



شکل ۱-۱ : نمایی از سطح مقطع اولین فیبر کریستال فوتونی هسته پر، با قطر حفره های هوای 300 nm و فاصله بین حفره های $2.3\text{ }\mu\text{m}$ [۳]



شکل ۲-۱ : نمایی از سطح مقطع اولین PCF هسته تهی، با فاصله بین حفره های $4.9\text{ }\mu\text{m}$ و قطر هسته $14.8\text{ }\mu\text{m}$ [۴].

۱-۳ سازوکار انتشار

به منظور تشکیل یک مد هدایت شده در یک فیبر نوری، باید نوری با ثابت β را به درون هسته هدایت کنیم، که β ثابت انتشار در راستای فیبر است که نمی‌تواند در غلاف منتشر شود. بالاترین میزان β موجود در یک محیط همگن نامحدود با ضریب شکست n ، $\beta = nk$ است که k ثابت انتشار در خلأ است. همه مقادیر کوچکتر از β در محیط منتشر می‌شوند. یک کریستال فوتونی دو بعدی مثل هر ماده دیگری، با یک میزان بیشینه β ای که می‌تواند منتشر شود، مشخص شده است. در یک طول موج خاص، این میزان β به مد اصلی بخش نامحدودی از ماده مربوط می‌شود و در این حالت β ضریب شکست مؤثر ماده را بیان می‌کند.

۱-۳-۱ بازتاب کلی داخلی تعدیل شده

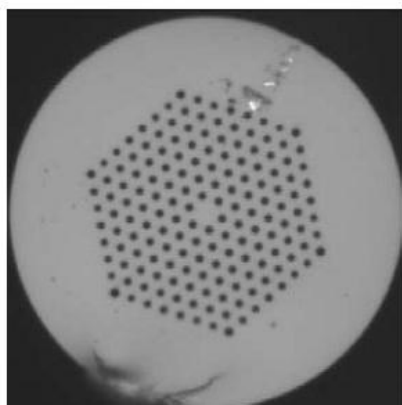
یک کریستال فوتونی دو بعدی را می‌توان به عنوان غلاف فیبر و یک ماده با ضریب شکست بالاتر نسبت به ضریب شکست مؤثر غلاف را به عنوان هسته انتخاب کرد. مثالی از این دسته از ساختارها یک PCF با هسته جامد سیلیکا است که توسط غلاف کریستال فوتونی با شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا، احاطه شده است. که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. این دسته از فیبرها که به فیبرهای ضریب شکستی معروفاند، نور را از طریق بازتاب کلی داخلی (TIR: Total Internal Refraction) هدایت می‌کنند، که بازتاب کلی داخلی تعدیل شده نامیده می‌شوند. با این وجود، این فیبرها ویژگی‌های متفاوتی نسبت به فیبرهای نوری معمولی دارند.

ویژگی تک مد نامحدود

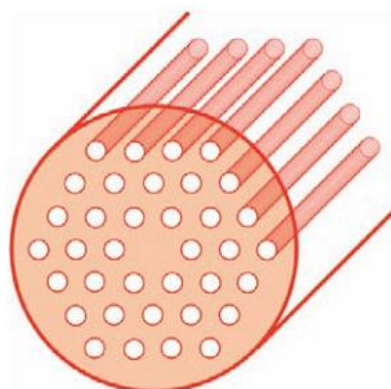
همانطور که اشاره شد، اولین PCF هسته جامد، که در شکل ۱-۱ آمده، شامل شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا با شعاع d در حدود 300nm ، و فاصله بین حفره‌های $\Lambda = 2.3\mu\text{m}$ است،

طبق آزمایش‌های صورت گرفته حتی در طول موج‌های کوتاه، به هیچ وجه چند مد نیست. در حقیقت مد منتشر شده همواره یک بخش مرکزی دارد که بخش مرکزی هسته را پر می‌کند [۵].

راشل عنوان کرد که این رفتار تک مد نامحدود خاص را می‌توان با در نظر گرفتن شبکه توری حفره‌های هوا به عنوان یک فیلتر مدی یا الک توجیه کرد [۵]. از آنجاییکه نور در هوا محو می‌شود، حفره‌های هوا به عنوان موانع محکمی عمل می‌کنند. بنابراین می‌توان آنها را همانند سیم‌های الک در نظر گرفت. میدان مد اصلی که درون هسته سیلیکا قرار می‌گیرد با یک بخش مرکزی با قطر بین صفر و کوچکتر یا مساوی 2λ ، مثل دانه‌های برنج که نمی‌توانند از درون شبکه‌های توری عبور کنند، درون شکاف‌های سیلیکا بین حفره‌های حلقه اول اطراف



(ب)



(الف)

شکل ۱-۳: (الف) شکل ظاهری یک PCF هسته جامد با شبکه توری مثلثی از حفره‌های هوا که نور در آن توسط بازتاب کلی داخلی منتشر می‌شود (ب) تصویر میکروسکوپی از یک PCF مثلثی هسته جامد ساخته شده، تهیه شده توسط Crystal Fiber A/Sⁱ.

هسته باریک می‌شوند. در مقابل، ابعاد پهنای میدان برای مدهای مرتبه بالاتر کوچکترند، به همین دلیل میدان می‌تواند بین شکاف‌ها نفوذ کند. وقتی نسبت $\frac{d}{\lambda}$ ، که کسر پرشدگی هوای