بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فیزیک

بخش فیزیک

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فوتونیک

بررسی ویژگی‌های دوشکستی، اتلاف حبسی و ناحیه مدی در فیبرهای شبه بلور فوتونی با تقارن 8 و 10_گانه

مؤلف:

وحدت زینالی

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسین زندی

دکتر علیرضا بهرامپور

استاد مشاور:

دکتر ابوالفضل بهرامپور

شهریور 93

تقدیم به :

پدرم

و

مادرم

که زیباترین مفهوم زندگیم هستند.

و نازگل

که شادی و اندوهم برای او زیبایی مسیر حرکتم شد.

سپاس گزاری

سپاس گزارم ابتدا از پروردگار.
و از اساتید راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر علیرضا بهرامپور و جناب آقای دکتر محمد حسین زندی که بسیار برایم زحمت کشیده اند. همچنین از استاد مشاور عزیزم جناب آقای دکتر ابوالفضل بهرامپور که بدون کمکهای بی دریغ ایشان امکان به نتیجه رسیدن این پایان نامه میسر نبود.

چکیده:

فیبرهای شبه بلور فوتونی همانند فیبرهای بلور فوتونی دارای ویژگی های بسیار جالبی از جمله تک مد بودن به‌طور بینهایت، پاشندگی فوق مسطح و دو شکستی بالا هستند. با توجه به وابسته بودن غلاف آن ها به طول موج و قابلیت دست کاری حفره‌های هوا در غلاف می‌توان ویژگی‌های فیزیکی را بهبود بخشید. اخیراً به دلیل وجود ساختار جالب و مشاهده‌ی ویژگی‌های فیزیکی بهبود یافته در فیبرهای شبه بلور فوتونی نسبت به فیبرهای بلور فوتونی و کاربرد آن‌ها در سیستم‌های مخابراتی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ما ویژگی‌های این فیبرها همچون ، پارامتر V، دوشکستی و ناحیه‌ی تک مد را محاسبه کرده و نهایتاً محدوده‌ی تک مد بودن و چند مدی را به خوبی نشان داده‌ایم. با توجه به اهمیت پارامتر دوشکستی در کاربردهای مختلف از جمله فیبرهای نگه‌دارنده‌ی قطبش و اینکه فیبر شبه بلور فوتونی 8 و10_گانه بصورت ذاتی دارای دوشکستی بسیار پایینی و در حد صفر می‌باشد، ما دو ساختار متفاوت اصلاح شده از این دو فیبر را پیشنهاد کرده و با بهینه‌کردن تمام پارامترهای مرتبط با سطح مقطع فیبرها، ویژگی دوشکستی را محاسبه و نمودار آنرا ترسیم کرده ایم.

کلید واژه ها: فیبر شبه بلور فوتونی ، پارامتر V ، ناحیه ی تک مد، دوشکستی

فهرست مطالب:

مقدمه.....1

فصل اول: مقدمه‌ای بر فیبرهای بلور فوتونی

1- 1 معرفی وتاریخچه.....5

1- 2 مکانیزم‌های هدایت در فیبر های بلور فوتونی.....9

1-3 فناوری ساخت فیبرهای بلور فوتونی.....11

1-4 روش‌های مدل سازی.....14

1- 5 ویژگی‌های فیبرهای بلور فوتونی تک مد.....18

1-5-1 فیبرهای تک مد بی نهایت.....18

1-5-2 سطح مد بزرگ.....20

1-5-3 ویژگی‌های پاشندگی.....21

1-6 مکانیزم‌های تلفات.....24

1-6-1 تلفات ذاتی.....24

1-6-1- 1 تلفات ذاتی در فیبرهای مغزی ی جامد.....24

1-6-1-2 تلفات ذاتی در فیبرهای مغزی ی توخالی.....25

1-6-2 اتلاف حبسی.....25

1-7 فیبرهای مغزی توخالی.....27

1-8 فیبرهایی با ویژگی های خاص.....29

1-8-1 فیبرهایی با دو مغزی.....29

1-8-2 فیبرهای با دو شکستی بالا.....30

1-8- 3 فیبرهای غیرخطی.....31

1-9 کاربردها.....33

فصل دوم: شبه بلورها و کاربردهای آن در فوتونیک

2-1 نظم شبه دوره ای.....36

2-2 انواع شبه بلورها.....38

2-2- 1 شبه بلورهای یک بعدی.....38

2-2-2 شبه بلورهای دو بعدی.....39

2-2-2-1 تقارن 8 _گانه.....39

2-2-2-2 تقارن 10_گانه.....40

2-2-2-3 تقارن 12_گانه.....41

2-2- 3 شبه بلورهای سه بعدی.....42

2-3 شبه بلورها در فوتونیک.....42

2-3-1 شبه بلورهای فوتونی یک بعدی.....43

2-3- 2 شبه بلورهای فوتونی با ابعاد بالاتر.....45

2-3-3 فرایند ساخت شبه بلورهای فوتونی 46

فصل سوم: بررسی فیبر شبه بلور فوتونی با تقارن 12_گانه

3-1 فیبر شبه بلور فوتونی تقارن 12_گانه با هدایت در هوا 51

3-2 فیبر شبه بلور فوتونی تقارن 12_گانه با شاخص پله ای.....56

3-2-1 ناحیه تک مد برای فیبر شبه بلور فوتونی 12_گانه 56

3-2-1-1 وابستگی منطقه های مورد مطالعه.....57

3-2-1-2 انرژی مد.....59

3-2-1-3 پهنای مد 60

3-2-2 ویژگی های پاشندگی فیبر شبه بلور فوتونی 12_گانه.....62

فصل چهارم: فیبر های شبه بلور فوتونی با تقارن های 8 و 10_گانه

4-1 ساختارهای هندسی 68

4-1-1 ساختار پنرس با تقارن 10_گانه..... 68

4-1-2 ساختار پنرس با تقارن 8_گانه..... 69

4-2 نتایج محاسبات و شبیه سازی ها..... 70

4-2-1 مدها و میدانهای الکترومغناطیسی..... 70

4-2-1-1 ساختار پنرس با تقارن 10_گانه..... 70

4-2-1-2 ساختار پنرس با تقارن 8_گانه..... 74

4-2-2 محاسبه ی پارامتر V و تعین ناحیه ی تک مد..... 76

4-2-3 ساختارهای هندسی اصلاح شده..... 80

4-2-4 دوشکستی 81

4-2-5 اتلاف حبسی..... 84

4-3 کاربردهای دوشکستی 85

4-4 نتیجه گیری و پیشنهادات..... 85

مقدمه:

فیبرهای نوری پایه اصلی سیستم های مخابراتی مدرن هستند. این فیبرها در انتقال اشعه برای پزشکی، شیوه های تشخیصی، حسگرها و عکس برداری به کار برده میشوند. کارهای مهمی روی طراحی فیبر نوری و عملکرد آن ها انجام شده است. یکی از برجسته ترین کارها استفاده از آرایش دوره ای از حفره های هوا در غلاف که در امتداد طول فیبر ادامه پیدا می کند و منجر به کلاس جدیدی از فیبر نوری می شود[1]. چنین فیبرهایی تحت عنوان فیبرهای بلور فوتونی شناخته می شوند زیرا ساختارهای دوره ای دی الکتریک، بلورهای فوتونی نامیده می شوند[2]. فیبرهای بلور فوتونی ویژگی‌های منحصر به فردی همچون اثرات غیر خطی و پاشنده بودن محیط را دارا هستند که می‌توانند تولید ابر پیوستار نوری تک مد با نوار پهن، پاشندگی مسطح، دوشکستی بالا و... را فراهم کنند[3-5]. این ویژگی‌ها از اختلاف زیاد ضریب شکست موثر و طبیعت دوبعدی ناشی از آرایش منظم حفره های هوا در ناحیه ی غلاف ریشه می‌گیرد.

ساختارهای شبه دوره‌ای، شبه بلورها، ساختارهای منحصر به فردی هستند که با داشتن نظم بلند برد دوره‌ای در کوتاه برد، دوره‌ای نیستند. محققان دریافته‌اند که ساختارهای شبه دوره‌ای میتوانند منجر به پدیده‌ها و ویژگی های غیر معمول شوند که در ساختارهای دوره‌ای مشاهده نشده است[6-7]. به عنوان مثال، در یک قطعه‌ی دی الکتریک از شبه بلوری از حفره‌های هوا با تقارن 12_گانه که با اختلاف ضریب شکست پایین استفاده شده است گاف های نوار فوتونی ایجاد می‌کند در حالیکه آرایش دوره‌ای با تقارن مشابه از حفره‌های هوا در قطعه‌ی دی الکتریک چنین چیزی را به وجود نمی‌آورد. ساختارهای شبه دوره ای دیگری همچون پیکربندی پنرس[1] و هشت گوشه ای برای بهبود عملکرد وسایل نوری مانند موجبرها و لیزرهای کاواکی با ضریب کیفیت بالا و ... به کار برده می‌شوند[8-12].

به کار بردن آرایش شبه دوره‌ای در فیبرهای نوری می‌توانند منجر به ویژگی‌های خاصی شوند که در فیبرهای بلور فوتونی یافت نمی‌شوند. اما ویژگی‌های این نوع دسته بندی از حفره های هوا در فیبرها و فیبرهای شبه بلور فوتونی، به ندرت بررسی شده است. با این وجود منطقی به نظر می رسد که نظم بندی شبه دوره ای از حفره های هوا روی ویژگی های نوری فیبرها اثر می گذارد و با مقایسه فیبرهای بلور فوتونی و فیبرهای شبه بلور فوتونی می‌توان به این مهم دست

[1] Penrose tiling

یافت. تقریباً اکثر کارها روی فیبر شبه بلور فوتونی با تقارن 12_گانه انجام شده است. با توجه به اینکه فیبرهای شبه بلور فوتونی همانند فیبرهای بلور فوتونی با دو مکانیزم انتشار بازتاب داخلی کلی تعمیم‌یافته و گاف نوار فوتونی کارمیکنند، هم هدایت در مغزی هوا و هم در مغزی‌ی سیلیکا برای این تقارن خاص مورد مطالعه قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر از 2007 تا کنون چندین کار روی فیبرهای شبه بلور فوتونی با تقارن 12_گانه انجام شده است که با توجه به تعداد کم آن‌ها ما خلاصه‌ای از کارهای انجام شده را در این چند سال بیان می‌کنیم. طراحی جدیدی از غلاف فیبر شبه بلور فوتونی 12_گانه که منجر به پاشندگی منفی بسیار بالا و پهن می شود، مورد بررسی قرار گرفته[13] و هم چنین در این کار تلفات حبسی و مدهای انتشار نیز مورد تحلیل گرفته است. ژاو[1] و همکارانش ناحیه‌ی تک مد و طول موج قطع برای فیبر شبه بلور فوتونی با تقارن 12_گانه و مقایسه آن با فیبر بلور فوتونی شش وجهی را نشان دادند[14].

فیبرشبه بلور فوتونی با تقارن 12_گانه همچنین به عنوان فیبر منبسط کننده‌ی پالس نوری در تقویت کننده های پالس کوتاه مورد استفاده قرار گرفته است که در مقایسه با فیبرهای دیگر دارای منبسط کنندگی بسیار بالا است [16]. تا اینجا تمامی کارها روی فیبرشبه بلور فوتونی 12_گانه با هدایت شاخص پله‌ای است اما انتشار نور در مغزی هوای چنین فیبری با برداشتن تعدادی از حفره های هوای مرکزی به عنوان مغزی نیز بررسی شده است [17]. در این کار مدهای انتشار و تلفات حبسی با اندازه‌های متفاوت مغزی هوا نشان داده شده است که تلفات بسیار پایینی حاصل شده است. همچنین در کار خاصی که روی فیبر شبه بلور فوتونی 8_گانه‌ی تعمیم یافته انجام شده است، در آن قابلیت انتشار در مغزی هوا برای فیبر شبه بلور فوتونی 8 گانه‌ی تعمیم یافته را با فیبر شبه بلور فوتونی 12_گانه با روش المان محدود مقایسه کرده است و دو گاف نوار فوتونی در ناحیه ی $\lambda/\Lambda< 1$ برای دو فیبر به خوبی نشان داده شده است [18].

در این پایان نامه، به دلیل ویژگی های جالب و منحصر به فرد شبه بلورهای با ساختار پنرس فیبرهای شبه بلور فوتونی با تقارن 8 و 10_گانه را مورد تحلیل و بررسی قرار داده ایم. هدف در این کار، به دست آوردن ویژگی‌های فیزیکی همچون پاشندگی، ناحیه‌ی تک مدی و دوشکستی و... دراین فیبرهاست. در فصل اول تاریخچه و تئوری فیبرهای بلور فوتونی را مرور کرده و یک بررسی کلی روی فرآیندهای مختلف فیبرهای بلور فوتونی انجام داده‌ایم.

[1] Zhao

در فصل دوم به‌دلیل آشنایی نسبی با شبه بلورها و کاربردهای آن ها در فوتونیک، این ساختارها و انواع آن ها را مورد بررسی قرار داده ایم و کارهای انجام شده روی شبه بلورهای فوتونی با تقارن های متفاوت را توضیح داده ایم.

در فصل سوم، در مورد فیبر شبه بلور فوتونی 12_گانه مطالعاتی انجام شده و کارهایی که تاکنون روی این نوع فیبر انجام شده را بیان کرده ایم.

در فصل چهارم، فیبرهای شبه بلور فوتونی با ساختار پنرس با تقارن 8و 10_گانه را با روش المان محدود و با توجه به هدفی که دنبال می کردیم، ویژگی فیزیکی این دو فیبر را مورد تحلیل و بررسی قرار داده ایم.در نهایت به سبب دست یافتن به دوشکستی بالا دو ساختار اصلاح شده با تقارن های 8 و 10_گانه را پیشنهاد داده ایم و ویژگی‌های نوری از جمله دوشکستی و تلفات حبسی و ... را مورد تحلیل قرار داده ایم. هدف در این کار رسیدن به یک دوشکستی بالا از مرتبه ی میلی متر بوده که با این دو ساختار پیشنهادی این هدف نائل شد.

فصل اول

مقدمه ای بر فیبرهای بلور فوتونی

فیبرهای بلور فوتونی، کلاس جدیدی از فیبرهای نوری هستند که ریز ساختار بلورمانند آن ها باعث بروز ویژگی های غیر عادی می شود. این فیبرها می توانند نور را نه تنها با فرآیند بازتاب داخلی کلی بلکه با اثر گاف نوار فوتونی هدایت کنند.

1-1 معرفی وتاریخچه

فیبرهای بلور فوتونی، فیبرهایی با یک ساختار دوره‌ای داخلی هستند که از حفره هایی پرشده از هوا تشکیل شده اند و نور می تواند در امتداد این فیبرها، در نقص های ساختار بلوری آن‌ها انتشار یابد. یک نقص با حذف یک یا چند حفره ی مرکزی تعیین می شود. ویژگی های ترکیبی فیبرهای نوری و بلورهای فوتونی منجر به یک سری از ویژگی های عجیب می شود که برای فیبرهای معمولی غیر ممکن است. فیبرهای نوری مرسوم برای کاربردهای مخابراتی و غیر مخابراتی بسیار مفید هستند اما، یک سری حبسی های بنیادی مرتبط با ساختار موجود در آن ها وجود دارد.

طراحی فیبرهای معمولی دارای قوانین ثابتی هستند از جمله: قطر مغزی محدود شده در منطقه ی تک مد، طول موج قطع معین ، انتخاب محدود ماده (ویژگی های حرارتی شیشه‌ی مغزی و غلاف باید یکسان باشند). طراحی فیبرهای بلور فوتونی دارای انعطاف زیادی است. چندین پارامتر برای دست کاری این نوع فیبرها وجود دارد: گام یا ثابت شبکه، قطر و شکل حفره‌ی هوا، ضریب شکست شیشه و نوع شبکه. آزادی عمل در طراحی، اجازه ساختن فیبرهای تک مد بی‌نهایت را به ما می‌دهد که در آن همه‌ی محدوده‌های نوری تک‌مد می‌باشند و در آن طول موج قطع وجود ندارد.

با دست کاری ساختار فیبر بلور فوتونی، طراحی ویژگی‌های مساعد پاشندگی امکان‌پذیر است. فیبرهای بلور فوتونی با داشتن پاشندگی صفر، کم و غیر عادی در طول موج‌های مرئی می‌توانند طراحی وساخته شوند و هم چنین پاشندگی می‌تواند در محدوده‌ی وسیعی از طول موج مسطح باشد. ترکیبی از پاشندگی غیرعادی با سطوح میدان مدی کوچک، فیبرهای غیرخطی مناسبی را بوجود می‌آورند. از طرف دیگر، فیبرهای تک مد با مغزی هوا و یا مغزی‌ی جامد نیز می توانندبه دست آیند.

ایده‌ی فیبر بلور فوتونی برای اولین بار توسط یه[1] [19] در سال 1978 ارائه شده است. آن‌ها پیشنهاد دادند که مغزی فیبر را با شبکه‌ی براگ که شبیه بلور فوتونی یک‌بعدی می‌باشد غلاف گذاری کنند. فیبر بلور فوتونی ساخته شده از یک بلور فوتونی دو بعدی با مغزی ی هوا توسط راسل[2] در سال 1992 پیشنهاد شده و اولین بار در کنفرانس فیبر نوری[3] در سال 1996 گزارش شد [20]. یک مرور کوتاهی از پیشرفت فیبر بلور فوتونی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول(1-1) : روند پیشرفت فیبر بلور فوتونی[21]

1978	ایده‌ی فیبر براگ[19]
1992	ایده‌ی فیبربلور فوتونی با مغزی هوا[20]
1995	وجود گاف‌های نوار فوتونی دوبعدی در فیبرهای بلور فوتونی مغزی هوا و سیلیکا برای ضریب شکست محوری کوچکتر از یک
1996	اولین فیبر بلور فوتونی مغزی سیلیکا[20]
1997	مفهموم تک‌مد بی‌نهایت[22]
1998	سطح مد فوق العاده بزرگ[23]
1999	مغزی خیلی کوچک با پاشندگی انتقال یافته[24]
1999	فیبر بلور فوتونی با گاف نوارفوتونی مغزی هوا[37]
2000	فیبر بلور فوتونی چند مغزی[72]
2000	نگه داشتن قطبش در فیبر بلور فوتونی
2000	تولید ابرپیوستار[25]
2001	لیزر کربن دی اکسید تشکیل شده از فیبر بلور فوتونی[26]
2001	فیبر بلور فوتونی پلیمری[27]
2002	توری‌های بلند دوره[28]

[1] Yeh
[2] P.Russell
[3] Optical Fiber Conference(OFC)

2002	پراکندگی رامان شبیه سازی شده در هیدروژن
2003	گاف‌های نوار فوتونی
2003	فیبر بلور فوتونی با شیشه‌ی تلوریت
2004	تولید زوج فوتون در فیبر بلور فوتونی[29]
2005	انتقال انرژی بالا در فیبر بلور فوتونی مغزی توخالی[30]
2005	گاف‌های نوار فوتونی با اختلاف ضریب شکست یک درصد[31]

در مرجع [21]، تاریخچه پیشرفت فیبر بلور فوتونی تا سال 2005 ذکر شده است. بنابراین خلاصه ای از کارهایی که در زمینه‌ی فیبر بلور فوتونی از سال 2006 تاکنون انجام شده، در جدول زیر آورده شده است .

جدول(1-2): کارهای انجام شده در زمینه ی فیبر بلور فوتونی از سال 2006 تاکنون

2006	فیبر بلور فوتونی تلوریت ساخته شده با روش انباشتن و کشش[32]
2006	منابع فیبر بلور فوتونی برای طیف نگاری غیرخطی[33]
2007	فیبر بلور فوتونی با پوشش‌های تشدید شده[34]
2007	تولید نوسانی یک تک قطبش با تقویت‌کننده‌ی فیبر بلور فوتونی تزریق شده با اربیوم[35]
2008	طراحی فیبر بلور فوتونی جبران کننده‌ی پاشندگی با الگوریتم ژنتیک[36]
2009	طراحی فیبر بلور فوتونی برای حسگر زیستی[37]
2010	فیبر بلور فوتونی با حساسیت بالا بر پایه‌ی طیف‌نگاری جذبی[38]
2010	حسگر فیبر بلور فوتونی نگه دارنده‌ی قطبش برای اندازه‌گیری تغییرات فشار[39]
2011	اثر فیبر بلور فوتونی در تولید ترکیب چهار موج[40]
2012	طراحی و ساخت فیبر بلور فوتونی بیسموت-سیلیکا[41]
2012	دینامیک‌های سالیتون در فیبر بلور فوتونی برای ریزبینی و ریزطیف نگاری

	رامان[42]
2013	ذخیره سازی نور در فیبر بلور فوتونی مغزی‌ی توخالی[43]
2013	فیبرگاف نوار فوتونی مغزی توخالی پرشده با زنون فوق بحرانی[44]

همچنین با توجه به مطالعاتی که در کشورمان در این چند سال روی فیبرهای بلور فوتونی انجام شده است، ما در جدول زیر نمونه‌ای از این کارها را آورده‌ایم.

جدول(1-3): خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در زمینه‌ی فیبر بلور فوتونی در کشورمان.

2006	بررسی پارامترهای فیبر بلور فوتونی با مغزی با ضریب شکست افزایش یافته و رسیدن به تلفات خمیدگی نزدیک به یک دهم فیبرهای بلور فوتونی معمولی[45]
2009	بررسی عددی فیبر بلور فوتونی با روش تفاضل متناهی در حوزه‌ی بسامد[46]
2011	بهینه سازی یک ترام[1] با تناوب بالا محاط شده در یک فیبر بلور فوتونی با سطح بزرگ مد برای طراحی فیبر گاف نوار[47]
2012	بررسی تلفات فرنل در محل اتصال بین یک فیبر تک‌مد و فیبر بلور فوتونی[48]
2012	بررسی فیبر بلور فوتونی هشت وجهی با مغزی‌ی تزریق شده با پاشندگی مسطح تقریباً صفر و تلفات کم در یک محدوده‌ی پهن طول موجی[49]
2012	طراحی یک متصل کننده‌ی فیبر بلور فوتونی دو مغزی بوسیله‌ی ابزارهای نفوذناپذیری ریز سیال مانند[50]
2012	طراحی فیبر بلور فوتونی فرکتال با پاشندگی پایین[51]

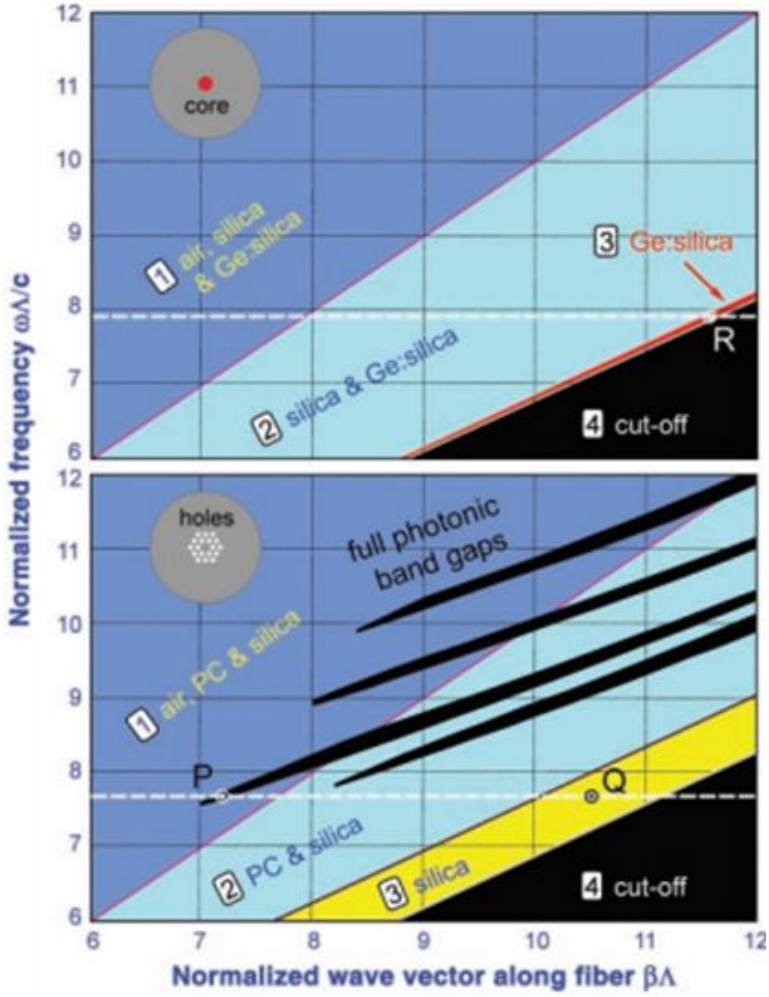
[1]grating

1- 2 مکانیزم‌های هدایت در فیبرهای بلور فوتونی

اگر توسط حذف حفره‌ی مرکزی، نقص ساختار مشخص شود، هدایت موج الکترومغناطیسی در فیبر بلور فوتونی می‌تواند توسط مکانیزم بازتاب داخلی کلی تعمیم‌یافته در نظر گرفته شود. این اصلاح و تعمیم مکانیزم به دلیل این است که تنها مد بنیادی به درون فیبر منتشر شود و از مد های بالاتر دارای نشتی جلوگیری به عمل آید. مد بنیادی، مدی است که دارای کوچکترین قطر و نزدیک به اندازه ی نقص یا به عبارتی نزدیک به ثابت شبکه‌ی دوره‌ای است[52و53]. مطابق مرجع[20]، یک فیبر در شرایطی تک مد است که دارای $d/\Lambda < 0/4$ باشد که در آن d قطر حفره هوا و Λ ثابت شبکه‌ی بلور است.

هدایت نور در فیبر بلور فوتونی، اولین بار در سال 1996 در یک فیبر مغزی سیلیکا دیده شد (هدایت مغزی جامد). اگر نقص مرکزی توسط وارد کردن یک حفره‌ی هوای بزرگتری نسبت به سایر حفره‌های هوا باشد، می‌توان گاف نوار فوتونی به‌دست آورد. هدایت نور شبیه مکانیزم شناخته شده‌ای در فیزیک حالت جامد است که در آن, مکانیزم هدایت الکترون در مواد با ساختار نوار انرژی بیان می‌شود. در سال 1997، هدایت نور در نقص پرشده از هوا مشاهده شده است(هدایت گاف نوار فوتونی با مغزی توخالی).

تعدادی حفره‌ی مرکزی حذف‌شده از یک شبکه‌ی شش‌گوشه‌ای، یک حفره‌ی بزرگ پرشده از هوا را به وجود می‌آورد [54]. حفره‌های هوای مرتب‌شده به‌طور دوره‌ای می‌توانند یک ساختار بلور فوتونی دوبعدی را تشکیل دهند که ثابت شبکه نزدیک به طول‌موج نور است. به دلیل اختلاف زیاد در ضریب شکست و ساختار پیچیده در فیبر بلور فوتونی، بحث محاسباتی پیچیده به‌نظر می‌رسد. بررسی‌های فیبرهای نوری معمولی کمکی به ما نمی‌کنند، بنابراین معادلات ماکسول باید به طور عددی حل شوند. نتایج به طور نمونه در نمودار زیر نشان داده شده است که محورهای آن بدون بعد و با مقادیر $\beta\Lambda$ و $\omega\Lambda/c$ هستند و این نمودار محدوده‌های بسامدی و مولفه‌ی بردار موج محوری β را نشان می‌دهد. در یک بسامد نوری ثابت، بیشترین مقدار ممکن β به‌وسیله‌ی رابطه kn که برابر با $\omega n/c$ است بیان می‌شود که در آن، n ضریب شکست ناحیه‌ی مورد مطالعه است.



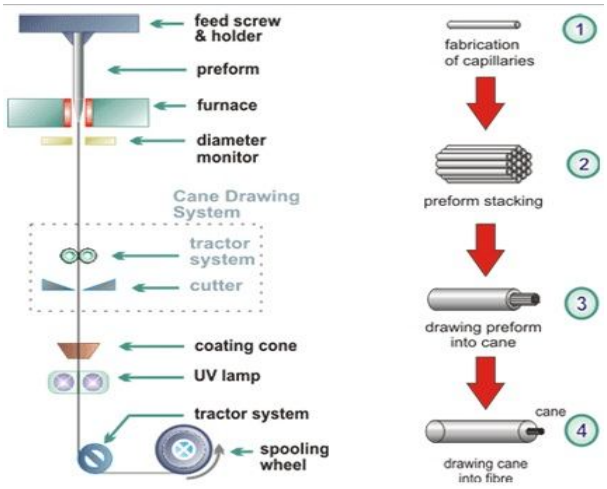
شکل(1-1): (الف) نمودار انتشار یک فیبر تک مد معمولی با یک مغزی سیلیکا تزریق شده با ژرمانیوم و یک غلاف سیلیکای خالص (ب) نمودار انتشار یک شبکه‌ی مثلثی از حفره‌های هوا در شیشه‌ی سیلیکا با کسر پرشدگی 45 درصد هوا.

برای $kn > \beta$ نور برای انتشار مجاز و برای $\beta > kn$ نور میراشونده است. در فیبر معمولی (ضریب شکست مغزی n_{co} و ضریب شکست غلاف n_{cl}) موقعی که نور برای انتشار در مغزی تزریق شده با Ge مجاز باشد، مدهای هدایت شده آشکار می‌شوند،اما این مدها درغلاف میرا شونده هستند(شکل(1-1)(الف)).بنابراین مدهای هدایت شده در نقاط شبیه R تشکیل می‌شوند، جایی که نور برای حرکت در مغزی مجاز، اما برای نفوذ در غلاف ناتوان است (به دلیل بازتاب داخلی کلی). هم‌چنین نوار قرمز باریک، جایی است که همه‌ی ارتباطات نوری در آن عمل می‌کنند. نکته جالب این است که تکامل تمام ارتباطات نوری در نوار باریک نوری در بازه ی

$kn_{cl}\Lambda<\beta\Lambda<kn_{co}\Lambda$ از شکل (1-1)(الف) اتفاق می‌افتد. نمودار مشابه برای فیبر بلور فوتونی به عنوان نمودار انگشتی یا نمودار نوار لبه‌ای شناخته می‌شود. در یک شبکه‌ی مثلثی با حفره‌های هوای دایروی که در آن کسر پرشدگی هوا 45 درصد است، نور در منطقه 4 شکل (1-1)(ب) میرااست. گاف‌های نوار فوتونی دو بعدی کامل در مناطق به شکل انگشتی وجود دارند و هم چنین بعضی از آن ها وارد منطقه ی $\beta< k$ می‌شوند و در آن می‌توانند در خلأ انتشار یابند. این نتیجه نشان می‌دهد که هدایت مغزی توخالی در سیستم هوا-سیلیکا امکان‌پذیر است. در ناحیه (1)، نور برای انتشار در هر ناحیه‌ای از فیبر(هوا، بلور فوتونی و شیشه) مجاز است، اما در ناحیه (2) انتشار در هوا و در ناحیه (3) انتشار در هوا و بلور فوتونی امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین در ناحیه (4)، نور برای انتشار در هر ناحیه‌ای میرا است.مدهای هدایت شده‌ی یک فیبر بلور فوتونی مغزی جامد در نقاطی شبیه Q تشکیل می‌شوند، جایی که نور برای انتشار در مغزی مجاز، اما برای نفوذ در بلور فوتونی مجاز نیست. در نقطه‌ی P، نور برای انتشار در هوا مجاز ولی برای نفوذ در غلاف توسط گاف نوار فوتونی غیرمجاز است و این‌ها شرایطی هستند که برای یک مد مغزی توخالی نیاز است.

3-1 فناوری ساخت فیبرهای بلور فوتونی

ساخت فیبرهای بلور فوتونی همانند فیبرهای معمولی است و نیاز به فناوری جدید و پیشرفته ندارد. برای ساخت آن‌ها از سیلیکای گداخته‌ی SiO_2، که برای فیبرهای نوری معمولی نیز به‌کار می‌رود، استفاده می‌شود. برای ساخت پیش‌سازه فیبر بلور فوتونی، لوله‌های باریک را در یک لوله‌ی محکم قرار می‌دهند و قالب مورد نظر را در یک کوره با دمای مناسب می‌کشند و نهایتاً فیبر بلور فوتونی ساخته می‌شود. در شکل زیر، یک پیش‌سازه‌ی فیبر بلور فوتونی نشان داده شده است. شکل (1-2) تصویر یک پیش سازه‌ی فیبر بلور فوتونی در حال کشش و نیزمرحله‌ی اولیه‌ی نحوه‌ی قرار گرفتن لوله‌های باریک در یک لوله‌ی نگه‌دارنده را نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل (1-2): مراحل ساخت پیش سازه‌ی فیبر بلور فوتونی – (الف) تصویر پیش سازه فیبر بلور فوتونی در حال کشش. و (ب) مرحله اولیه‌ی نحوه‌ی قرار گرفتن لوله‌های باریک در یک لوله‌ی نگه‌دارنده.

انتخاب قطر لوله‌های باریک بسیار مهم است، زیرا باید قطر پیش‌سازه در حال ساخت قابل کنترل باشد. بنابراین اگر قطر لوله‌ها بسیار کوچک باشد، فرآیند کشش غیر قابل کنترل و اگر قطر بسیار بزرگ باشد، قرار دادن پیش‌سازه در کوره دچار مشکل می‌شود. بهترین انتخاب برای قطر لوله 0/5 تا 1 میلی‌متراست. ابعاد این لوله‌های باریک را می‌توان با استفاده از یک برج کشش فیبر از 1 تا 3 سانتی متر به 1 میلی‌متر کاهش داد.

برای حفظ حالت لوله‌ها تا پایان فرایند کشش لازم است که قطر و شکل لوله‌ها تا حد کافی یکسان باشند. لوله‌های انباشته شده با استفاده از سیم تنتالیوم[1] در چندین مکان نگه داشته میشوند تا به صورت عمودی قرار گیرند. فرآیند کشش پیش‌سازه‌ی فیبر بلور فوتونی بسیار شبیه فیبرهای معمولی است با این تفاوت که پارامترهای کشش حساس‌تر هستند. تصویر شماتیک از فرآیند ساخت فیبر بلور فوتونی در شکل (1-4) نشان داده شده است.

[1]Tantalum