

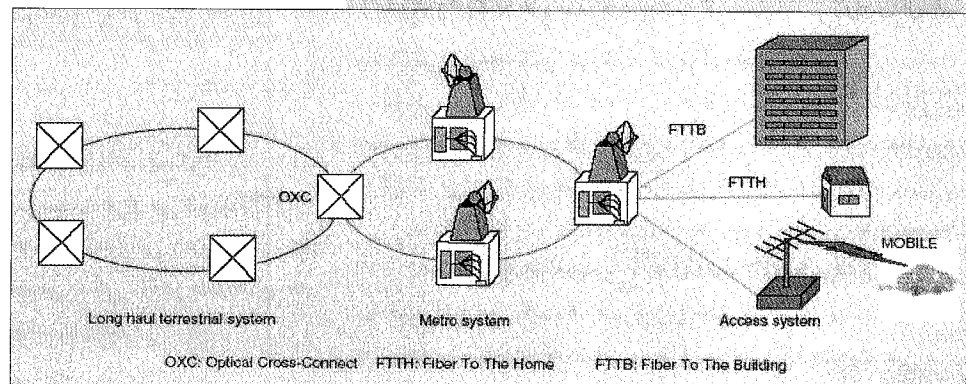
مروری بر روند رشد و توسعه فیبرهای نوری تک مد در شبکه های مخابرات نوری

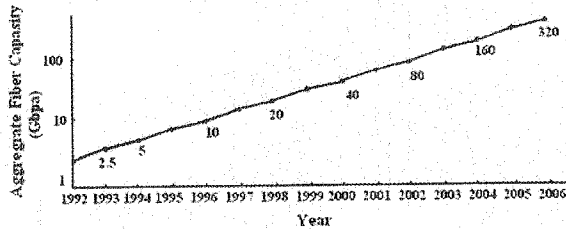
فرامرز اسمعیلی سراجی و نیلوفر پاکزاد افشار
بژهشکده انتقال، گروه سیستم ها و ادوات مخابرات نوری،
مرکز تحقیقات مخابرات ایران، انتهای کارگر شمالی، تهران
feseraji@itrc.ac.ir

۱- مقدمه

در یک دهه اخیر، به دلیل رشد روز افزون تقاضای پهنای باند و نیاز به کارگیری ارتباط داده ها در شبکه های جهانی، محققان و صنعتگران صنایع مخابراتی را بر آن داشت که در فعالیت های تحقیقاتی و نحوه به کارگیری سامانه ها طوری برنامه ریزی کنند تا پاسخگوی شبکه های نسل آینده موسوم به NGN باشند. یکی از راه های مقابله با هجوم داده ها در گستره جهانی، استفاده از سامانه های پر ظرفیت است که برای این منظور معرفی و توسعه یافته اند. این نوع سامانه ها بر اساس مدوله سازی تقسیم طول موج (WDM) کار می کنند که در آنها تعدادی طول موج برای انتقال داده ها در یک کانال مخابراتی به کار گرفته می شوند [۱]. یک نمونه از سیستم WDM در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن انواع مختلف سامانه های انتقال نظیر، سیستم انتقال زمینی راه دور، سامانه های انتقال مترو و دسترسی به کار گرفته شده اند. در سامانه های انتقال زمینی راه دور و مترو، ظرفیت انتقال بیش از ترابیت در ثانیه (Tbit/s) در هر فیبر است. طول انتقال در سامانه های راه دور بالغ بر ۲۰۰ کیلومتر و در سامانه های مترو از ۲۰ تا ۲۰۰ کیلومتر است [۲، ۳].

شکل (۱): نمونه ای از یک سامانه WDM شامل انواع مختلف سامانه های انتقال نظیر انتقال زمینی راه دور، مترو و سامانه انتقال دسترسی.





شکل (۲): آهنگ افزایش انتقال داده بر حسب زمان [۵۰]

در سامانه های فیبرنوری تلاش بر این است تا با کاهش عوامل محدود کننده، با صرف هزینه کمتر به ظرفیت هایی با کیفیت و کمیت بیش تر دست یابیم. برای داشتن ظرفیت های بالا در انتقال فیبرهای نوری دور راه وجود دارد، اولی افزایش آهنگ بیت و دومی استفاده از سامانه های "همتا فتگر تقسیم طول موجی" (WDM) است. کاربرد روش دوم به همراه جبران سازهای الکترونیکی جالب توجه نیست زیرا هر کانال WDM به یک تکرار کننده و تقویت کننده منحصر بفرد الکترونیکی نیاز خواهد داشت، اما با ساخته شدن "تقویت کننده نوری آلائیده با اربیم" EDFA افزایش ظرفیت از طریق WDM به نحو چشمگیری گسترش یافته است [۷۵]. اما به هر حال سامانه های WDM نیز دارای محدودیت هایی هستند که از آن جمله می توان پاشندگی رنگی، نوفه تقویت کننده EDFA و وابستگی بهره آن به طول موج، اثرات غیر خطی، تلفات و غیره را نام برد.

۱-۲- پاشندگی رنگی در فیبرهای نوری تک مد

پاشندگی رنگی در فیبر نوری به صورت زیر تعریف می شود [۷۶]:

$$D = \frac{k}{c\lambda} \left(\frac{d^2\beta}{dk^2} \right) \text{ ps/nm.km} \quad (1)$$

که در آن k, λ, c, β به ترتیب سرعت نور در خلاء، عدد موج، طول موج نور، و ثابت انتشار مد اصلی را معرفی می کنند. با استفاده از تقریب هدایت ضعیف می توان رابطه پاشندگی را بسط داده و در نهایت به حاصل جمع سه مؤلفه دست یافت [۷۶]:

- یکی از عبارات های به دست آمده به صورت $|d^2n/d\lambda^2|(\lambda/c)$ معرف پاشندگی ماده خواهد بود. این پاشندگی از آنجا ناشی می شود که مواد مختلف با توجه به ساختار مولکولی متفاوتشان، ضابطه های مختلفی نیز برای تغییرات ضریب شکست (n) بر حسب طول موج دارند و پاشندگی های متفاوتی را به دست می دهند که عبارتند از:

- عبارتی متناسب با $d\Delta/d\lambda$ که معرف پاشندگی نمایه است.
- قسمتی که متناسب با $V[d^2(Vb)/dV^2]$ بوده و پاشندگی موجبر را بیان می کند. هر فیبرنوری حتی در غیاب پاشندگی ماده، با توجه به ساختار هندسی و طول موجی که هدایت می کند،

یکی از دغدغه های طراحان چنین سامانه ها، محیط انتقال و هزینه تمام شده شبکه های طراحی شده است که در قالب شبکه های NGN، این دو عامل باید با کیفیت، ارزان و با ضریب اطمینان بالا باشند. از طرف دیگر، چنین شبکه های ارزان در سامانه های مترو و دسترسی در اولویت هستند. اگر بعد و تراکم این شبکه ها را در دسترسی نوری در نظر بگیریم، عوامل مذکور از نظر کیفی و کمی، متغیرهایی هستند که در هزینه کل شبکه سهم قابل توجهی را به خود اختصاص می دهند. حجم فیبرهای نوری مورد مصرف برای FTTH نیز در شبکه های آینده قابل ملاحظه خواهد بود. بنابراین، برای طراحی شبکه های ارزان و کارآمد باید فیبرهایی طراحی و ساخته شوند تا در حین تولید انبوه، حفظ کیفیت آنها تضمین شود [۴]-[۷].

فیبرهای نسل آینده اساساً باید دارای ویژگی هایی همچون تلفات پایین، پاشندگی جبران پذیر و مبرا از اثرات غیر خطی باشند تا به ترتیب انتقال راه دور، ظرفیت بالا و عدم تداخل سیگنال ها در آنها تضمین شوند. چون در کانال های متعدد سامانه های WDM بر ظرفیت چگالی توان سیگنال بالا است، پدیده غیر خطی در محیط انتقال یعنی فیبرنوری رخ می دهد. از عمده ترین انواع پدیده های غیر خطی که در این نوع سامانه ها باعث اعوجاج سیگنال ها می شوند، آمیختگی چهار موج (FWM) و مدوله سازی فاز متقاطع (XPM) هستند. بنابراین کاهش اثرات غیر خطی در فیبرهای نوری مورد استفاده در سامانه های انتقال WDM یک امر ضروری است.

برای دستیابی به چنین ویژگی هایی، فیبرهای NZDSF از اوایل دهه ۹۰ [۵۸-۸] و فیبرهای PCF از اواخر دهه ۹۰ طراحی و مورد توجه قرار گرفته اند. [۷۳-۵۹]

در این گزارش، با مروری بر روند رشد و توسعه فیبرهای نوری، طراحی، ساخت و توصیف فیبرهای نوری پر ظرفیت با عملکرد بالا برای شبکه های نسل آینده ارائه خواهد شد. فیبرهایی که بررسی خواهند شد از نوع NZDSF تک مد هستند که هر یک از آنها به نوبه خود از خصوصیات بر خوردار هستند که مناسب شبکه های نسل آینده است.

۲- عوامل محدود کننده انتشار در فیبرهای نوری تک مد

به کارگیری فناوری فیبرنوری از اوایل دهه ۱۹۷۰ باعث افزایش قابل توجه ظرفیت انتقال و درعین حال کاهش هزینه شبکه های مخابراتی شده است. فیبرهای نوری را بر حسب کاربرد آنها در شبکه می توان به دو گروه ادواتی و انتقال تقسیم کرد. نوع اول برای کارهای معینی از قبیل جبران پاشندگی و یا تزویج توان و نوع دوم برای ارسال علائم در شبکه مورد استفاده قرار می گیرند [۷۴]. پهنای باند مورد نیاز شبکه های مخابراتی همواره در حال افزایش بوده است به طوری که مطابق شکل (۲) در سال های اخیر در هر ۲۴ الی ۳۰ ماه دو برابر شده است [۵۰].



"آمیختگی طول موج" (FWM) بیش از سایر پدیده‌های غیرخطی، اثرات نامطلوب ایجاد می‌کند [۷۵، ۵۰]. همه پدیده‌های غیرخطی از جمله آمیختگی طول موج، "خود مدولاسیون فازی" SPM و یا فرایندهای پراکندگی به سطح مقطع مؤثر فیبر نوری بستگی دارند. این وابستگی به صورت نسبت n_{eff} / n_{eff} ظاهر می‌شود، که در آن n_{eff} و n_{eff} به ترتیب سطح مؤثر و ضریب شدت نور در رابطه ضریب شکست غیرخطی هستند. بنابراین همان طور که از این نسبت استنباط می‌شود، افزایش n_{eff} و کاهش n_{eff} هر دو در کاهش اثرات غیرخطی مؤثر هستند.

۲-۳-۱- پدیده آمیختگی طول موج

آمیختگی طول موج یا FWM پدیده‌ای است که در آن از ترکیب سه طول موج سیگنال متفاوت، یک طول موج سیگنال چهارم ایجاد می‌شود. اگر $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ سه طول موج سیگنال منتشره در فیبر نوری باشند، FWM حاصل از آنها در طول موج‌های زیر تولید می‌شود [۷۵]:

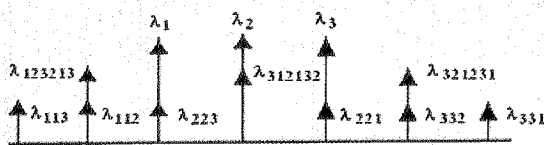
$$\lambda' = \lambda_1 \pm \lambda_2 \pm \lambda_3 \quad (2)$$

این کانال‌های اضافی تولید شده نه تنها باعث افت تدریجی توان می‌شوند بلکه با بعضی از طول موج‌های اصلی سیگنال همپوشانی می‌کنند، در نتیجه بین کانال‌های مختلف همشنوایی اتفاق می‌افتد. شکل (۳) فرایند ایجاد FWM برای سه طول موج $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ را به صورت تولید $\lambda_{123} = \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3$ نشان می‌دهد [۵۰]. اگر N تعداد کانال‌های اولیه باشد، تعداد مؤلفه‌های ترکیبی تولید شده به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$m = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (3)$$

به عنوان مثال، با استفاده از رابطه (۳) می‌بینیم که برای تعداد کانال‌های اولیه ۳ و ۹، تعداد مؤلفه اضافی به ترتیب ۹ و ۳۲۴ خواهد شد. به همین ترتیب تعداد طول موج‌های اضافه تولید شده در یک سیستم ۳۲ کاناله به ۱۵۸۷۲ عدد می‌رسد [۵۰].

دوراهکار برای مقابله با FWM وجود دارد: اولی استفاده از فاصله کانال‌ها برابر است. این روش FWM را کاهش نمی‌دهد ولی مانع همشنوایی می‌شود. روش دوم جابجا کردن طول موج کار از روی طول موج پاشندگی صفر ۱۵۵۰ نانومتر است، به این دلیل که FWM در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بیش از سایر طول موج‌ها ظاهر می‌شود [۷۵].



شکل (۳): مؤلفه‌های FWM برای سه طول موج $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$

پاشندگی خاصی به نام پاشندگی موجبر ایجاد می‌کند. یکی دیگر از عوامل محدود کننده ظرفیت فیبر نوری پاشندگی مد قطبشی (PMD) است. در فیبرهای نوری با سطح مقطع دایروی دو عامل باعث ایجاد PMD می‌شوند، اول اینکه تغییر حالت هندسی دایروی فیبر نوری و فشارهای جانبی باعث ضریب شکست نامتقارن و پدیده PMD می‌شود. عامل دوم خمش‌ها و پیچش‌ها هستند که باعث می‌شوند دو مؤلفه متعامد قطبش در مد اصلی با سرعت گروه‌های متفاوت منتشر شوند و پاشندگی مد قطبشی پالس را افزایش دهند. برای به حداقل رساندن ظرفیت فیبر نوری PMD باید حذف شود.

۲-۲- تقویت کننده EDFA در سامانه‌های WDM

تقویت کننده فیبر نوری آلاییده با اربوم یا EDFA اولین بار در سال ۱۹۸۷ ساخته شده [۷۵] که در آن فیبر نوری آلاییده کار تقویت پالس نوری را انجام می‌دهد. در EDFA یک طول کوتاه ۵ الی ۵۰ متری از فیبر نوری شیشه‌ای قرار دارد که مغزی آن توسط اربوم (یکی از عناصر خاکی نادر) به میزان ۲۰۰ ppm (معادل ۱۰۲۵ یون در هر متر مکعب) آلاییده شده است. تقویت سیگنال نوری در این محیط توسط گسیل القایی در یون‌های Er^{3+} صورت می‌گیرد. محدوده طول موجی این تقویت کننده ۱۵۳۰ الی ۱۵۷۰ نانومتر است [۷۵]. با به کار بردن تقویت کننده نوری، پالس نوری مستقیماً تقویت می‌شود و دیگر نیازی به فرایندهای پیچیده تبدیل‌های سیگنال الکتریکی و نوری به یکدیگر نیست. همچنین EDFA می‌تواند به طور همزمان همه طول موج‌های در حال انتشار را تقویت کند و به همین دلیل برای سامانه‌های WDM مناسب است، اما یکی از معایب EDFA این است که بهره آن به پنجره طول موجی که سیستم در آن کار می‌کند، بستگی دارد. بنابراین روش‌های مختلفی برای به دست آوردن بهره تخت برای EDFA در دست بررسی هستند.

تقویت کننده‌های نوری EDFA نیز مانند "جبران‌سازهای الکترونیکی" از نوع 3R ایجاد نوفه می‌کنند هر چند که نوفه حاصل از آنها در مقایسه با جبران‌سازهای 3R بسیار کم و در حدود ۳ الی ۴ دسی بل است [۷۵]. برخی یون‌های Er^{3+} که دارای انرژی‌های بالاتری هستند علاوه بر گسیل القایی ممکن است گسیل خود بخودی نیز داشته باشند که با نور فرودی غیرهم‌دوس است. بعضی از این پرتوهای خود بخودی با مد LP_{01} تزویج شده و مانند آن تقویت می‌شوند. آنچه به دست می‌آید گسیل خود بخودی تقویت شده "ASE" نامیده می‌شود. ASE همراه سیگنال منتشر می‌شود و در آشکار ساز فوتونی با آن تداخل کرده و در تحلیل داده ایجاد مشکل می‌کند.

۲-۳- اثرات غیر خطی

تقویت پالس نور در سامانه‌های WDM و افزایش شدت نور باعث ظهور پدیده‌های غیرخطی می‌شود. در میان این آثار، پدیده



۲-۳-۲- پدیده خود مدولاسیون فازی

یکی دیگر از پدیده‌های غیر خطی قابل توجه در فیبرهای نوری شیشه‌ای "خود مدولاسیون فازی" (SPM) است. شیشه یک ماده آمورف است که رابطه قطبش در آن به صورت بیان می‌شود [۷۵]:

$$p = \epsilon_0 \chi E + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots \quad (4)$$

که در آن χ ، $\chi^{(3)}$ و E به ترتیب گذردهی خلاء، پذیرفتاری الکتریکی خطی، پذیرفتاری الکتریکی غیر خطی مرتبه سوم و میدان الکتریکی نور تابشی هستند. با قرار دادن میدان الکتریکی نوسانگر نور در رابطه (۴) رابطه زیر را برای قطبش به دست می‌آوریم [۷۵]:

$$p = \epsilon_0 \left(\chi + \frac{3}{2} \frac{\chi^{(3)}}{c \epsilon_0 n_0} I \right) E \quad (5)$$

همچنین می‌دانیم که رابطه کلی قطبش به صورت زیر است:

$$p = \epsilon_0 (n^2 - 1) E \quad (6)$$

بنابراین با مقایسه دو رابطه اخیر و به کار بردن تقریب تیلور می‌توان ضریب شکست شیشه را به صورت زیر به دست آورد:

$$n = n_0 + n_{nl} I \quad (7)$$

که در آن داریم:

$$n_0 = \frac{3}{4} \frac{\chi^{(3)}}{c \epsilon_0 n_0^2} \quad (8)$$

$$l = \frac{1}{2} c \epsilon_0 n_0 E_0^2 = \frac{P}{A_{eff}} \quad (9)$$

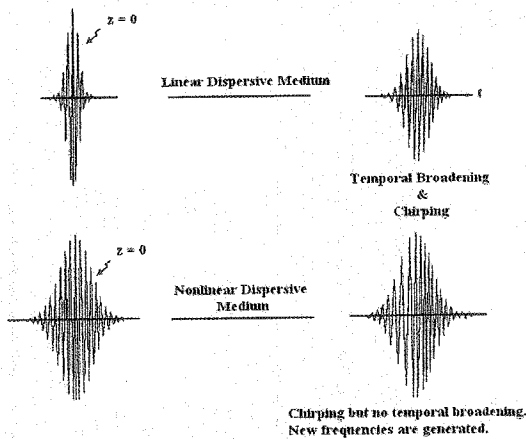
در رابطه‌های بالا c ، n_0 ، P و A_{eff} به ترتیب معرف شدت نور، سرعت نور در خلاء، ضریب شکست خطی، دامنه میدان الکتریکی نور، توان مد انتقالی و سطح مقطع موثر فیبر نوری هستند. وابستگی ضریب شکست به شدت مد در فیبر نوری باعث پدیده SPM می‌شود. اثر پدیده SPM باعث پهن شدن طیف پالس بدون گسترش زمانی می‌شود. در SPM طول موج‌های بزرگتر از طول موج مرکزی در جلوی پالس و طول موج‌های کوچکتر از آن در عقب پالس حرکت می‌کنند، یعنی دقیقاً بر عکس آنچه که در پاشندگی خطی در بالای طول موج پاشندگی صفر اتفاق می‌افتد. به همین دلیل با انتخاب توان و شیب پالس مناسب می‌توان اثر SPM را با پاشندگی خطی جبران کرد [۷۵]. در شکل (۴)، اثرات SPM و پاشندگی خطی روی یک پالس در حال انتشار مقایسه شده‌اند.

۲-۴-۲ مکانیزم‌های تلفات در فیبرهای نوری

مکانیزم‌های تلفات در فیبرهای نوری تحت تاثیر ساختار موجبر، روش‌های آماده‌سازی، ترکیبات مواد تشکیل دهنده موجبر و خلوص آنها قرار می‌گیرند. این مکانیزم‌ها را می‌توان به دو گروه عمده جذبی و تابشی تقسیم کرد [۷۵]: تلفات جذبی می‌تواند ماهیت ذاتی و اکتسابی داشته باشد و تلفات تابشی می‌تواند ناشی

از پراکندگی، خمش و همبافت باشد.

تلفات پراکندگی شامل دو گروه خطی (رایلی و می) و غیر خطی (بریلیون و رامان) است و تلفات خمشی نیز شامل دو گروه بزرگ خمش و ریز خمش است.



شکل (۴): اثر پاشندگی خطی به صورت گسترده‌گی زمانی و اثر SPM به صورت گسترده‌گی در بسامد ظاهر می‌شود [۷۵].

۲-۴-۱- تلفات جذبی

مولکول‌های مواد سازنده فیبر نوری برخی طول موج‌ها را جذب می‌کنند و مانع انتشار آنها می‌شوند. برای مثال SiO_2 جاذب ناحیه فرو سرخ است. حضور ذرات ناخالصی مثل یون‌های فلزی و -OH در شیشه می‌تواند باعث حذف برخی طول موج‌های انتشاری شوند. به همین دلیل خلوص شیشه در تولید فیبر نوری بسیار مهم است. به عنوان مثال، وجود ۱ ppm یون Fe^{++} می‌تواند منجر به تلفات ۰/۶۸ دسی بل بر کیلومتر در طول موج ۷۱ میکرون بشود [۷۵].

۲-۴-۲- تلفات پراکندگی‌های خطی

پراکندگی‌های خطی شامل پراکندگی رایلی و پراکندگی می (Mie) است که هر دو ناشی از خواص فیزیکی غیر ایده‌آل فیبر نوری هستند که در حین ساخت ایجاد می‌شوند. پراکندگی‌های خطی تغییری در بسامد نور منتشره در فیبر نوری ایجاد نمی‌کنند [۷۶].

در پراکندگی رایلی هر طول موج در برخورد با مولکولی کوچک‌تر اما قابل مقایسه با آن پراکنده می‌شود و میزان پراکندگی با توان چهارم طول موج نسبت معکوس دارد. این نوع پراکندگی معمولاً در همه جهات بوده و رابطه تضعیف ناشی از آن به صورت زیر بیان می‌شود [۷۶]:

$$\alpha_R \propto \exp(-\gamma L) \quad (10)$$

$$\gamma(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (11)$$

یعنی حداقل انحنایی که نور را در مسیر نگه می دارد به صورت زیر به دست می آید [۷۶]:

$$R_C \approx \frac{3 n_1^2}{4 \pi (n_1^2 - n_2^2)^{3/2}} \lambda \quad (14)$$

که در آن λ طول موج بر حسب میکرومتر، R_C شعاع بحرانی بر حسب میکرومتر و n_1 و n_2 به ترتیب ضریب شکست مغزی و غلاف هستند. هر چقدر شعاع خمیدگی کم تر باشد نور بیش تری هدر می رود. بنابراین برای اصلاح تلفات خمشی موجبر باید سعی کنیم شعاع بحرانی کوچک تر شود. با توجه به رابطه (۱۴) می بینیم هر چقدر طول موج منتشره در فیبر نوری کوتاه تر و تغییرات نسبی ضریب شکست آن بزرگ تر باشد، شعاع بحرانی و به دنبال آن تلفات بزرگ خمش کاهش می یابد [۷۶]. در مجاورت طول موج قطع حساسیت به خمیدگی بیش تر است. هر چقدر طول موج قطع مدهای مرتبه بالا کوتاه تر باشد، میدان مد بیشتر داخل غلاف شده و باعث افزایش تلفات خمشی می شود.

	Before interaction	After interaction
STOKES		
ANTI-STOKES		

شکل (۵): پدیده رامان که طی آن بسامد زاویه ای تغییر می کند [۷۷].

۲-۴-۵- تلفات ریزخمش

یک پوشش سخت با انعطاف پذیری کم باعث ایجاد خمیدگی ریز می شود و نور از مغزی به صورت نشتی خارج می شود. خمش های ریز ممکن است در زمان تولید فیبر، در حین کابل سازی و یا به هنگام نصب و اتصال ایجاد شوند.

۲-۴-۶- تلفات همبافت

هنگام همبافت دو فیبر نوری تک مد قسمتی از نور در اثر عدم انطباق دقیق در محل جوش به هدر می رود. این عدم انطباق می تواند به صورت های عرضی، طولی، زاویه ای و یا مربوط به اندازه لکه های نامساوی باشد. اگر w_1 و w_2 اندازه لکه های دو فیبر نوری متصل شده باشند، تلفات ناشی از نامساوی بودن w_1 و w_2 عبارت است از [۷۵]:

$$\alpha_s (dB) = -20 \log \left(\frac{2 w_1 w_2}{w_1^2 + w_2^2} \right) \quad (15)$$

اگر محورهای دو فیبر نوری در محل جوش با یکدیگر زاویه θ بسازند و در امتداد عرض موجبر نیز به اندازه u از هم فاصله داشته باشند، تلفات ایجاد شده به صورت زیر به دست می آید [۷۵]:

که در آنها، L ، γ و λ و به ترتیب تضعیف، طول فیبر نوری، ضریب تضعیف و طول موج منتشره هستند.

پراکندگی می که به عنوان پراکندگی موجبر نیز شناخته می شود، ناشی از ناهمگنی های قابل مقایسه با طول موج نور هدایتی است که معمولاً در امتداد انتشار به جلو صورت می گیرد [۷۶]. این نوع پراکندگی به دلیل وجود نقص هایی در موجبر از قبیل عدم یکنواختی هندسی و تشکیل حباب های ریز در مغزی و یا مرز آن با غلاف اتفاق می افتد. این عیب ها و ترک ها ممکن است هنگام ساخت یا بعد از آن ایجاد شده باشند.

۲-۴-۳- تلفات پراکندگی های غیر خطی

پراکندگی های غیر خطی در فیبر نوری شامل پراکندگی های بریلیون و رامان است. این پدیده ها در توان های بالای نور رخ می دهند و طی رخداد این پدیده ها، بسامد نور منتشره در فیبر نوری تغییر می کند. پراکندگی بریلیون به اندرکنش فوتون فرودی با شبکه جامد مربوط می شود که فوتون کشسانی حاصل از آن یک جابجایی بسامد ایجاد می کند. این نوع پراکندگی یک فرایند برگشتی است. توان نوری آستانه ای که باید در یک فیبر نوری تک مد مورد استفاده قرار گیرد تا پراکندگی بریلیون اتفاق نیفتد عبارت است از [۷۶]:

$$P_B = 4.4 \times 10^{-3} (2a)^2 \lambda^2 \alpha (dB) \Delta \lambda \quad \text{watts} \quad (12)$$

که در آن a ، λ و $\Delta \lambda$ به ترتیب شعاع مغزی، طول موج (میکرومتر)، تضعیف بر حسب دسی بل بر کیلومتر و پهنای طیف منبع (گیگا هرتز) هستند.

در پراکندگی رامان هنگام اندرکنش فوتون فرودی با مولکول، انرژی دورانی یا ارتعاشی به این فوتون اضافه یا از آن کم می شود [۷۷]. پراکندگی رامان در امتداد انتشار به جلو اتفاق می افتد و توان آستانه لازم برای آن، که حدود سه برابر مقدار مورد نیاز پراکندگی بریلیون است، از رابطه زیر به دست می آید [۷۶]:

$$P_R = 5.9 \times 10^{-2} (2a)^2 \lambda \alpha (dB) \quad \text{watts} \quad (13)$$

جابجایی بسامد در این پدیده مستقل از طول موج منبع است زیرا ترازهای انرژی که انتقال های بین آنها صورت می گیرد، مشخصه ای از ساختار ماده هستند [۷۷]. در شکل (۵) پدیده رامان که طی آن بسامد زاویه ای تغییر می کند، نشان داده شده است. با تنظیم درست متغیرهای دو رابطه (۹) و (۱۰)، توان آستانه اثرات غیر خطی قابل افزایش است.

۲-۴-۴- تلفات بزرگ خمش

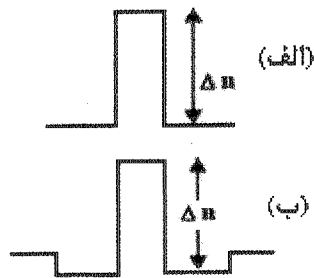
شرط لازم برای دوران باریکه نور در یک خمیدگی بزرگ فیبر نوری این است که آن نقاطی از میدان مد که در شعاع های بزرگ تری در حرکت هستند، باید سرعت های بیش تری نیز داشته باشند. در غیر این صورت باریکه از مسیر منحرف می شود و به بیرون از مغزی نشت می کند. این نوع تلفات بر حسب شعاع انحنای موجبر به طور نمایی تغییر می کند. شعاع بحرانی خمش،



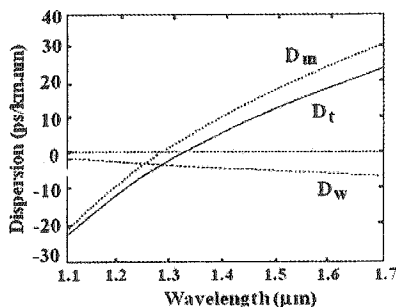
صفر است. در شکل (۸) منحنی های پاشندگی کل (D_t) شامل پاشندگی ماده (D_m) و پاشندگی موجبر (D_w) نشان داده شده اند. در این گروه فیبر نوری دو نوع نمایه مورد استفاده قرار می گیرد، یکی ضریب تطبیقی و دیگری ضریب فشرده که به ترتیب در شکل (۷الف) و (۷ب) نشان داده شده اند [۲۷، ۳۱، ۷۸].

۴- فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته

در فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته (DSF) با تغییرات ابعاد و اختلاف نسبی ضریب شکست بین مغزی و غلاف در نمایه ضریب شکست می توان پاشندگی صفر در پنجره طول موج ۱۳۰۰ نانومتر را به پنجره ۱۵۵۰ نانومتر انتقال داد. مزیت فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته نسبت به فیبرهای نوری تک مد معمولی در استفاده از پنجره طول موج کم ترین تلفات یعنی پنجره ۱۵۵۰ نانومتر است. به این ترتیب موجبری حاصل می شود که به طور همزمان دارای تلفات و پاشندگی کمینه است. برای بهینه سازی تلفات، طول موج قطع و شیب پاشندگی فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته نمایه های متفاوتی طراحی شده اند که در اینجا نمونه های عمده مورد بررسی قرار می گیرند.



شکل (۷): نمایه ضریب پلهای (الف) غلاف تطبیقی و (ب) غلاف فشرده فیبر نوری تکمد [۲۷، ۳۱].



شکل (۸): پاشندگی کل صفر در طول موج ۱/۳ از مجموع پاشندگی های موجبر و ماده به دست می آید [۷۵].

۴-۱- نمایه ضریب پله ای

ساده ترین نمایه فیبر نوری با پاشندگی انتقال یافته به صورت ضریب پله ای است. در پنجره طول موجی ۱۵۵۰ نانومتر پاشندگی ماده در فیبر نوری شیشه ای مقدار قابل ملاحظه ای است. بنابراین باید به طریقی پاشندگی موجبری را افزایش دهیم تا بتواند پاشندگی ماده را خنثی کند و در نتیجه پاشندگی کل در فیبر صفر شود. پاشندگی موجبری در فیبر

$$\alpha \text{ (dB)} = 4.34 \left[\left(\frac{u}{w} \right)^2 + \left(\frac{\pi n_1 w_0 \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (16)$$

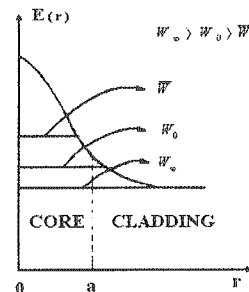
که در آن n_1 ضریب شکست محیط واسط بین دو فیبر نوری و w_0 اندازه لکه های پترمان ۱- و پترمان ۲- هستند. اگر در محل اتصال دو فیبر نوری یک فاصله محوری به اندازه D وجود داشته باشد، تلفات ناشی از آن به صورت زیر به محاسبه می شود [۷۵]:

$$\alpha_l = 10 \log \left[1 + \left(\frac{D \lambda}{2 \pi n_1 w^2} \right)^2 \right] \quad (17)$$

در شکل (۶) لکه های مد اصلی در مغزی فیبر نوری نسبت به غلاف نشان داده شده است. هر چه قدر اندازه لکه مد اصلی بزرگ تر باشد، انتشار انرژی در غلاف بیش تر می شود.

۳- فیبرهای نوری تک مد معمولی

در فیبرهای نوری تک مد پاشندگی بین مدی که مؤثرترین مؤلفه پاشندگی است، وجود ندارد و به همین دلیل پهنای باند آنها بسیار بالاست. به طور مثال، پهنای باند در فیبرهای نوری شیشه ای در پنجره مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر با ۱۰۰ نانومتر و متناظر با حدوداً "۱۲۵۰۰ گیگا هرتز است [۷۵]. پهنای باند قابل توجه فیبرهای نوری تک مد کاربرد آنها را در سامانه های ارتباطات نوری فراگیر کرده است و رسیدن به سامانه هایی با ظرفیت های بسیار بالا را امکان پذیر ساخته است. فیبرهای نوری تک مد را بر حسب پاشندگی آنها می توان به گروه های فیبرهای نوری معمولی، فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته، فیبرهای نوری با پاشندگی تخت و فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته غیر صفر تقسیم کرده و برای هر کدام از آنها نمایه های متفاوتی ارائه داد. طراحی این نمایه ها بر اساس بهینه سازی متغیرهایی مثل قطر میدان مد، طول موج قطع، سطح مقطع مؤثر، تلفات، پاشندگی و شیب آن صورت می گیرد.



شکل (۶): لکه های مد اصلی [۲۸].

فیبرهای نوری تک مد معمولی (CSF) اولین نسل فیبرهای نوری هستند که در پنجره ۱۳۰۰ نانومتر کار می کنند. نمایه ابتدایی ترین فیبرهای نوری تک مد از نوع "نمایه ضریب پله ای" است که چگونگی تغییرات ضریب شکست بر حسب فاصله شعاعی از محور این نوع فیبر نوری در شکل (۷) نشان داده شده است [۲۷]. در طول موج ۱۳۰۰ نانومتر، پاشندگی ماده مثبت و پاشندگی موجبری منفی است. در نتیجه پاشندگی کل این فیبرهای نوری در این طول موج

۴-۲- نمایه ضریب تدریجی

فشارهای ناشی از ناهمگنی‌ها در مرز بین مغزی و غلاف در فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته صفر که نمایه ضریب پله‌ای داشتند، تلفات اضافی را ایجاد می‌کردند. به همین علت طراحی نمایه‌های تدریجی پیشنهاد شد. در این فیبرهای نوری ضریب شکست از طریق درجه بندی غلظت ماده، به طور تدریجی کاهش داده شد و شکل پله‌ای آن از بین رفت.

این گروه از فیبرهای نوری تک مد را "ضریب تدریجی" می‌نامند و ساده‌ترین حالت آن نمایه "مثلثی" است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ساخت اولین نمایه مثلثی در سال ۱۹۸۲ گزارش شد [۲۹]. این فیبرنوری دارای تلفات ۰/۳ دسی بل در کیلومتر و طول موج پاشندگی صفر در ۱۵۵۰ نانومتر بود. دومین نمونه فیبرنوری با نمایه مثلثی نیز در همان سال ساخته شد [۳۰] که تلفات در آن به ۰/۲۴ دسی بل بر کیلومتر در طول موج ۱۵۶۰ نانومتر کاهش داده شد. مزیت این ساختار نسبت به قبلی، شعاع میدان بزرگ تر بود که تلفات اتصال را کاهش داده بود [۲۷]. در شکل (۱۱) تلفات کششی فیبرها با نمایه‌های مثلثی و پله‌ای مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که تلفات اضافی ناشی از شرایط کشش در فیبرهای نوری ضریب مثلثی نسبت به نوع ضریب پله‌ای کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد [۲۷]. کم‌ترین تلفات گزارش شده برای فیبرهای نوری پاشندگی انتقال یافته با نمایه مثلثی، حدود ۰/۲۱ دسی بل بر کیلومتر در پنجره طول موج ۱۵۵۰ نانومتر است [۸۰]. تلفات فیبرهای تجاری در این طول موج حتی به ۰/۱۸ دسی بل بر کیلومتر رسیده است (به سایت‌های شرکت‌های کورنینگ و لوسنت مراجعه کنید).

اشکال عمده فیبرهای نوری ضریب مثلثی طول موج قطع کوتاه در آنهاست که در طرح‌های اولیه حدود ۰/۸۵ میکرون بود و باعث حساسیت زیاد نسبت به خمش می‌شد [۷۵].

راه حل‌هایی برای افزایش طول موج قطع در فیبرهای نوری پاشندگی انتقال یافته با نمایه مثلثی در نظر گرفته شد که از آن میان طراحی "نمایه مثلثی با غلاف فشرده" [۸۱، ۸۲] است که طول موج قطع مد LP_{۱۱} در آن به حدود ۰/۱ میکرومتر افزایش داده شد. همچنین نمایه‌های "دوزنقه‌ای" و "گوسی" نیز برای افزایش طول موج قطع مطرح شدند. اولین فیبرنوری ضریب تدریجی که با استفاده از روش VAD ساخته شد [۸۳]، دارای نمایه گوسی بود که در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر تلفاتی معادل ۰/۲۱ دسی بل در کیلومتر نشان می‌داد. در شکل (۱۲) نمایه‌های دوزنقه‌ای، گوسی و غلاف فشرده نشان داده شده‌اند.

نوری ضریب پله‌ای از رابطه زیر به دست می‌آید [۷۵]:

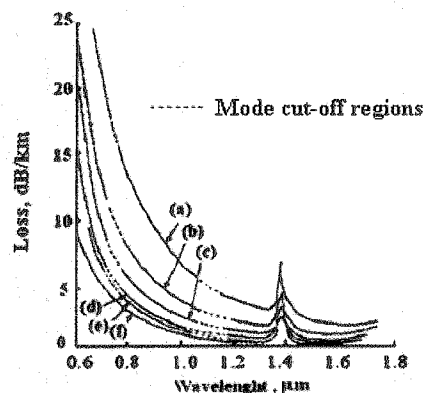
$$D_w \approx \frac{-n_2 \Delta}{3\lambda} \left[V \frac{d^2(bV)}{dV^2} \right] \times 10^7 \text{ (ps/km.nm)} \quad (18)$$

که در آن n_2 ضریب شکست غلاف، Δ اختلاف نسبی ضریب شکست بین مغزی و غلاف، λ طول موج در حال انتشار، V بسامد بهنجار و b ثابت انتشار بدون بعد است. در رابطه (۱۸) مشاهده می‌شود که یکی از راه‌های افزایش پاشندگی موجبر ثابت ماندن V و افزایش Δ است. در نتیجه طبق رابطه‌ای که بسامد بهنجار را تعریف می‌کند:

$$V = \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \sqrt{2\Delta} \quad (19)$$

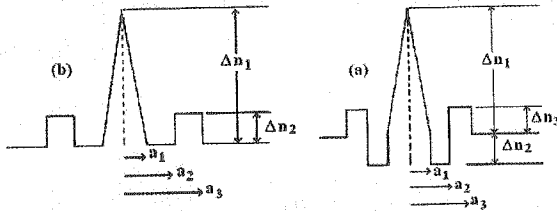
شعاع مغزی باید کاهش یابد. اشکال این روش آن است که افزایش Δ نیازمند افزایش آلایندگی‌های مغزی مانند ژرمانیوم است که تلفات پراکندگی را افزایش می‌دهد.

اولین تحقیق عملی جابه‌جایی پاشندگی در سال ۱۹۷۹ گزارش شد [۷۹] که در آن یک شعاع مغزی ۲/۴ میکرومتری به همراه یک Δ زیاد منجر به پاشندگی صفر در طول موج ۷۵۴ میکرومتر شده بود، اما تلفات بالاتر از ۲ دسی بل در کیلومتر حاصل شد. این تلفات اضافی ناشی از دو عامل بود: آلایش مغزی به ژرمانیوم که برای افزایش متغیر صورت گرفته بود، باعث افزایش پراکندگی رایلی شد. عامل دوم نیز شرایط فیزیکی کشش فیبرنوری طی فرایند ساخت بود. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، به هنگام ساخت فیبرنوری، در یک آهنگ کشش ثابت، افزایش دما باعث افزایش قابل توجه تلفات می‌شد. بنابراین دما تا میزانی که فیبرنوری آسیب نبیند کاهش داده شد اما همچنان تلفات اضافی ناشی از فشار وارد بر مرز مغزی و غلاف به دلیل اختلاف ضرایب انبساط حجمی آنها وجود داشت. به منظور کاهش این گرادیان فشار، تلاش‌هایی صورت گرفت تا توسط درجه بندی غلظت ماده ضریب به طور تدریجی کاهش داده شود و در واقع نوع دیگری از نمایه‌ها برای فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته طراحی شدند.

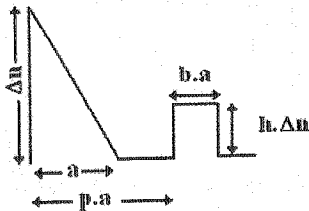


شکل (۹): وابستگی تلفات به دمای کشش فیبر نوری برای یک فیبر نوری ضریب پله‌ای با پراکندگی رایلی [۲۹].

کم و ارتفاعی قابل مقایسه با اختلاف ضریب شکست های مغزی و غلاف بوده و فاصله آن از مغزی به اندازه کافی اختیار شود، تلفات مناسبی به دست می آید. در شکل (۱۵) مشاهده می شود که با موازنه دو منحنی می توان ارتفاع مناسبی برای حلقه تعیین کرد و طول موج قطع را نیز به حدود ۷۴ میکرومتر افزایش داد.

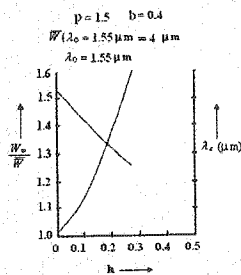


شکل (۱۳): دو نمونه از نمایه های ضریب چند گانه.

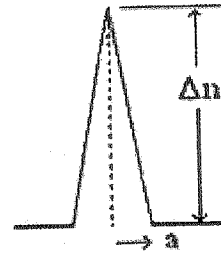


شکل (۱۴): نمایه فیبر نوری مغزی پلکانی [۸۴].

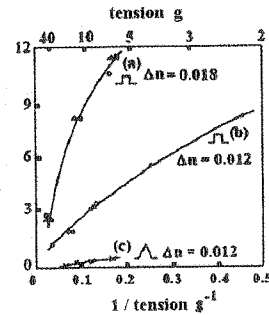
نوع دیگری از فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته پیشرفته با نمایه مغزی دو تایی "است. در فیبرهای نوری DSF با نمایه مغزی دو تایی در شکل (۱۶)، مغزی شامل یک قسمت مرکزی و یک لبه است. در قسمت مرکزی تغییرات ضریب شکست می تواند به صورت هر کدام از نمایه های تدریجی باشد. در این نمایه اختلاف ضریب شکست مغزی و غلاف بسته به نوع تغییرات مغزی مرکزی می تواند متفاوت باشد. همان طور که در شکل (۱۶) مشاهده می شود، در قسمت مرکزی مغزی، تغییرات ضریب شکست می تواند به صورت هر کدام از نمایه های تدریجی باشد. در این نمایه اختلاف ضریب شکست مغزی و غلاف بسته به نوع تغییرات مغزی مرکزی می تواند متفاوت باشد. در گزارشی که در آن نسبت برای این نوع نمایه بررسی شده [۲۸]، در تلفات اتصال یکسان ($\bar{W} = 4\mu\text{m}$) تلفات پراکندگی برای نمایه های مغزی پله ای، گوسی و مثلثی به ترتیب افزایش یافته است.



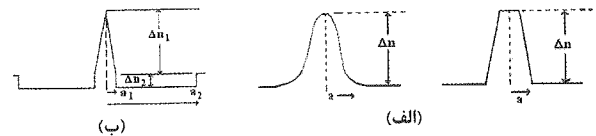
شکل (۱۵): وابستگی نسبت به ضریب ارتفاع h [۸۴].



شکل (۱۰): نمایه ضریب مثلثی فیبر نوری DSF [۲۹].



شکل (۱۱): مقایسه تلفات کشش نمایه های ضریب مثلثی و ضریب پله ای [۲۷].



شکل (۱۲): نمایه های دوزنقه ای، گوسی و غلاف فشرده.

۵- فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته پیشرفته

اگر طول موج قطع مدهای مرتبه بالا کوتاه باشد، گسترش میدان مد به درون غلاف بسیار زیاد می شود، در نتیجه تلفات خمشی نیز افزایش می یابد. این گستردگی غیر مجاز می تواند توسط نزدیک کردن طول موج قطع به پنجره ۱۵۵۰ نانومتر از بین برود. به این منظور نمایه هایی طراحی شده اند که با پاشندگی انتقال یافته پیشرفته نامیده می شوند [۲۸]. از جمله این نمایه ها می توان به "ضریب چند گانه" و "مغزی دو تایی"، مطابق شکل (۱۳)، اشاره کرد. در نمایه ای از نوع مغزی پلکانی در شکل (۱۴)، حلقه اضافه شده در ناحیه غلاف نقش بهینه سازی طول موج قطع مدهای مرتبه بالا و قطر میدان مد را به عهده دارد. برای کاهش تلفات خمشی، W_{∞} (اندازه لکه پترمان-۳) باید تا حد امکان کوچک باشد اما برای کاهش تلفات اتصال ناشی از عدم انطباق عرضی (اندازه لکه پترمان-۲) باید تا جایی که ممکن است بزرگ باشد [۸۴].

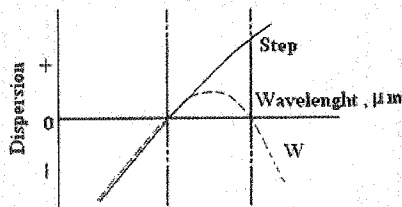
بنابراین برای این که تلفات خمشی و تلفات اتصال به طور همزمان کم شوند، سعی می شود تا نسبت نزدیک به واحد باشد. در گزارشی که در آن نسبت برای یک فیبر نوری مغزی پلکانی بررسی شده [۸۴]، می توان ملاحظه کرد که اگر حلقه دارای پهنای



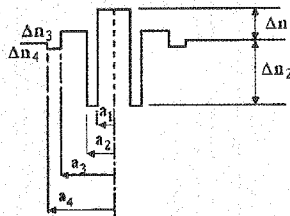
شکل (۱۸): نمایه W یا غلاف دوگانه [۲۷].

پاشندگی در این ساخت معادل ± 1 میکوتانیه در کیلومتر در نانومتر در بازه طول موجی ۱۳۲ تا ۱۴۳ میکرومتر بوده و تلفات آن مقدار قابل ملاحظه ۶٪ دسی بل در کیلومتر به دست آمد. در شکل (۱۹) پاشندگی نمایه های W شکل و ضریب پله ای با هم مقایسه شده اند [۲۷].

حساسیت زیاد نمایه های W نسبت به خمیدگی به دلیل کارکرد در نزدیکی طول موج قطع بود. بنابراین کاربرد عملی آنها را پس از سال ۱۹۸۲ متوقف کردند [۷۸] و ساختاری به نام "غلاف چهارگانه" یا QC مطرح شد که در شکل (۲۰) نشان داده شده است. در این نمایه یک ناحیه فشرده ثانویه به غلاف اضافه شده است. در نتیجه در فرایند ساخت آن چهار متغیر فاصله شعاعی مربوط به نواحی فشرده و چهار اختلاف نسبی ضریب شکست



شکل (۱۹): مقایسه منحنی پاشندگی برای نمایه های W و ضریب پله ای [۲۷].

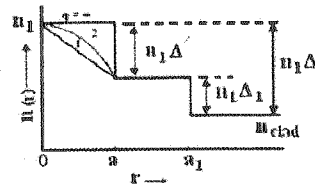


شکل (۲۰): نمایه QC با هشت پارامتر قابل کنترل [۲۷].

باید کنترل شوند. به همین دلیل دقت ساخت در آن بسیار مهم است و به خصوص روش (PCVD) می تواند مناسب باشد [۲۷].

۷- فیبرهای نوری با پاشندگی غیر صفر انتقال یافته

افزایش شدت نور در فیبرهای نوری تک مد باعث بروز اثرات غیر خطی نامطلوب به خصوص "آمیختگی طول موج" می شود. با توجه به این که FWM در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر بیش از سایر طول موج ها ظاهر می شود، یکی از راه های مقابله با آن انتقال طول موج پاشندگی صفر از ۱۵۵۰ نانومتر به طول موج دیگری است [۷۵]. در شکل (۲۱) موقعیت طول موج های پاشندگی صفر برای فیبرهای پاشندگی انتقال یافته و پاشندگی غیر صفر انتقال یافته (NZDSF) در بازه کاربرد تقویت کننده های نوری آلاییده با اربیم (EDFA) نشان داده شده است. اثرات غیر خطی ضریب شکست در فیبرنوری توسط نسبت n_1/A_{eff} بیان می شود که در آن n_1 ضریب شدت در رابطه ضریب شکست غیر خطی است و مشخصه ای از ماده است.

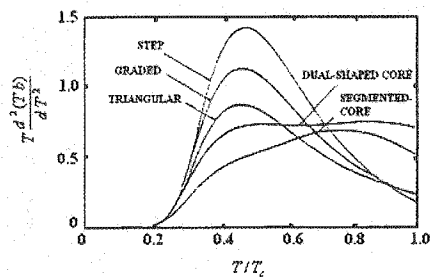


شکل (۱۶): نمایه مغزی دوتایی [۵۷].

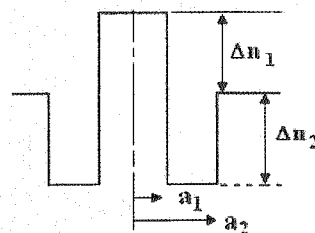
همچنین با بررسی پاشندگی موجبر این نمایه و مقایسه آن با نمایه های دیگر [۳۳]، ملاحظه می شود که به دلیل شیب بسیار کم پاشندگی در فیبرنوری با نمایه مغزی دوتایی کنترل پاشندگی می تواند به خوبی صورت گیرد. در شکل (۱۷) پاشندگی بهنجار موجبر بین فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته با نمایه های مختلف ضریب پله ای، ضریب تدریجی، مغزی مثلثی، مغزی پلکانی و مغزی دوتایی مقایسه شده اند [۳۳]. در شکل مذکور مشاهده می شود که فیبرنوری با نمایه مغزی پلکانی بین سایر نمایه ها از کم ترین پاشندگی برخوردار است اما نمایه مغزی دوتایی دارای تخت ترین پاشندگی است یا در واقع شیب پاشندگی آن از همه کم تر است.

۶- فیبرهای نوری تک مد با پاشندگی تخت

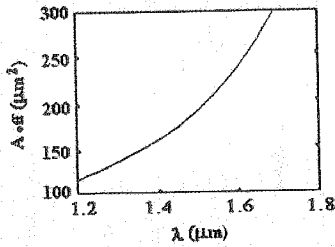
مفهوم پاشندگی کم در بازه ای از طول موج، اولین بار در سال ۱۹۷۴ مطرح شد [۳۸]. در ساختار نمایه مغزی به شکل W مطابق شکل (۱۸) پیشنهاد شده بود، یک ناحیه نسبتاً باریک فشرده در غلاف باعث خمیدگی منحنی پاشندگی می شد و در دو نقطه محور طول موج را قطع می کرد، یعنی دو طول موج پاشندگی صفر وجود داشت. ساخت این نمایه ضریب شکست موسوم به فیبرهای نوری با پاشندگی تخت (DFF)، اولین بار با بهره گیری از روش MCVD به مرحله اجرا درآمد [۱۳].



شکل (۱۷): مقایسه پاشندگی بهنجار موجبر بین پنج نمایه مختلف [۳۳].



شکل (۲۲): نمایه سه بعدی NZDSF با غلاف دوتایی [۸۶].

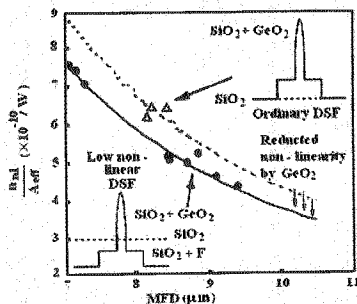


شکل (۲۳): تغییرات سطح مقطع مؤثر بر حسب طول موج در فیبر نوری NZDSF با غلاف دوتایی [۸۶].

۷-۲ - نمایه مغزی دوتایی

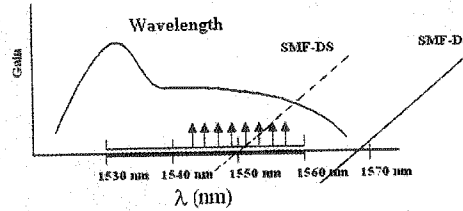
در یک فیبر نوری با توجه به این که اثرات غیرخطی با نسبت n_{nl}/A_{eff} ارزیابی می شود، می توان اثرات غیرخطی و به خصوص پدیده خود مدولاسیون فازی SPM را از طریق کم کردن n_{nl} کاهش داد. یکی از نمونه های NZDSF با نمایه مغزی دوتایی گزارش شده است [۸۷] که در آن n_{nl} به عنوان مشخصه ای از ماده به وسیله افزودن دی اکسید ژرمانیوم کاهش یافته است، اما برای این که تغییری در Δ ایجاد نشود، ضریب شکست غلاف نیز توسط فلئور کاهش داده شده است. بنابراین می توان ملاحظه کرد که در چنین نمایه ای دو فیبر نوری پاشندگی انتقال یافته و پاشندگی غیر صفر انتقال یافته، دارای Δ یکسان هستند ولی n_{nl} برای نوع پاشندگی غیر صفر انتقال یافته یا کم تر است. به علاوه قطر میدان مد در هر دو مساوی است، در نتیجه در NZDSF بدون این که تلفات خمشی افزایش یافته باشد اثرات غیرخطی کاهش داده شده است.

شکل (۲۴) مقایسه نسبت n_{nl}/A_{eff} نسبت به قطر میدان مد (MFD) را برای فیبرهای پاشندگی انتقال یافته و پاشندگی انتقال یافته غیر صفر (NZDSF و DSF) نشان می دهد. در این شکل ملاحظه می شود که با وجود MFD یکسان، غیر خطیت نوع NZDSF نسبت به نوع DSF کم تر است. همچنین شکل (۲۵) نشان می دهد که پس از طی مسافت های مساوی، پدیده غیرخطی SPM یا خود مدولاسیون فازی در نمونه NZDSF کم تر از DSF معمولی ظاهر می شود.



شکل (۲۴): مقایسه نسبت برای دو فیبر نوری DSF و NZDSF [۸۷].

بنابراین با کاهش n_{nl} و افزایش سطح مقطع مؤثر فیبر نوری می توان اثرات غیرخطی را کاهش داد. فیبرهای نوری پاشندگی غیر صفر انتقال یافته نیز مانند فیبرهای پاشندگی انتقال یافته، دارای نمایه های متفاوتی هستند که به عنوان مثال، در اینجا چند نمونه مورد بررسی قرار می گیرند.



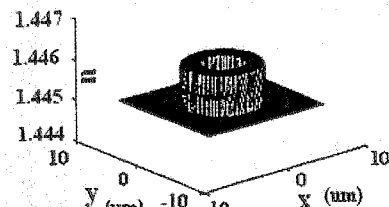
شکل (۲۱): موقعیت طول موجهای پاشندگی صفر برای فیبرهای نوری DSF و NZDSF در باند بهره EDFA [۵۰].

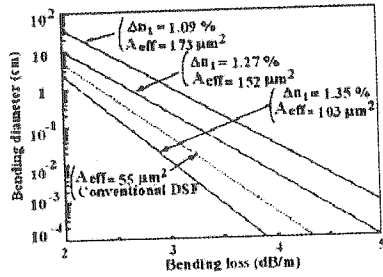
۷-۱ - نمایه غلاف دوتایی

نمایه ضریب شکست فیبر نوری پاشندگی غیر صفر انتقال یافته معروف به غلاف دوتایی که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، می تواند شامل یک ناحیه مغزی مرکزی به همراه دو غلاف اختیار شود [۸۶]. با توجه به این که برای ایجاد سطح مقطع مؤثر گسترده تر، باید میدان های عرضی کم تری درون مغزی محصور شوند، اولین لایه غلاف در این نمایه نسبت به قسمت های دیگر دارای بیش ترین ضریب شکست خواهد بود. به این ترتیب نور بیش تری به غلاف نفوذ می کند و انرژی در سطح گسترده تری منتقل شده و شدت نوری که منجر به اثرات غیرخطی می شود کاهش می یابد.

میدان های عرضی در نواحی مختلف این طرح به صورت توابع بسط هستند که با قرار دادن آنها در رابطه انتگرالی سطح مقطع مؤثر، مساحت آن به دست می آید. در این جا مغزی متشکل از شیشه گداخته است و n_{nl} به عنوان مشخصه ای از ماده برای این مغزی $20 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ مجذور متر مربع بر وات است.

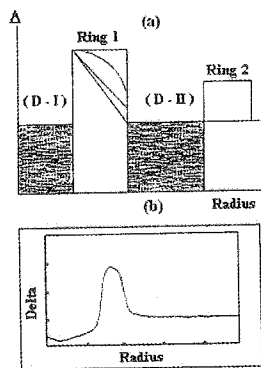
سطح مؤثر این فیبر حدود ۲۱۰ میکرومتر مربع به دست می آید یعنی تقریباً چهار برابر ناحیه مؤثر یک فیبر نوری با پاشندگی انتقال یافته (DSF). این در حالی است که پاشندگی و تلفات خمشی و نیز تلفات اتصال این فیبر نوری در حد فیبرهای نوری معمولی بوده و طول موج قطع مد LP_{11} برابر ۱۲۲۰ نانومتر است. در شکل (۲۳) تغییرات سطح مقطع مؤثر یک فیبر نوری با پاشندگی انتقال یافته با نمایه غلاف دوتایی نسبت به طول موج نشان داده شده است که در آن با افزایش طول موج، طول موج سطح مقطع مؤثر به صورت نمایی افزایش می یابد.



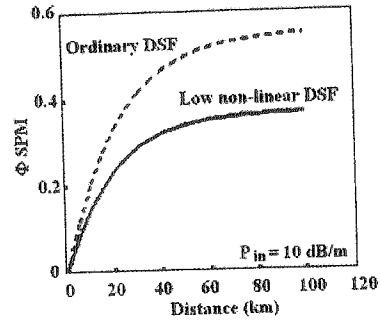


شکل (۲۷): مشخصات تلفات خمشی فیبرهای DSF و NZDSF نسبت به قطر انحنا با سطح مقطع های مؤثر مختلف [۸۸].
۴-۷- نمایه با غلاف حلقه دار

در نمایه حلقه دار دو حلقه در غلاف وجود دارد که اولی الزامی و دومی اختیاری است. حلقه دوم صرفاً برای انعطاف پذیری بیشتر در تغییرها است. در این نوع نمایه سطح مقطع مؤثر توسط دورکردن حلقه از مغزی و کاهش ضریب شکست مغزی می تواند افزایش پیدا کند. اگرچه با انتخاب پهنا و ارتفاع مناسب برای حلقه می توان پاشندگی را در نزدیکی ۱۵۵۰ نانومتر معادل صفر نگه داشت، اما قطع مدهای مرتبه بالاتر در طول موج های بلندتر اتفاق می افتد، بنابراین در این پنجره کاربرد تک مد برای این فیبرنوری میسر نیست. کاهش ضریب شکست روش مؤثرتری برای افزایش طول موج های قطع مدهای مرتبه بالا، به دست آوردن سطح مقطع مؤثر نسبتاً وسیع و تلفات خمشی مناسب است و می تواند در مغزی (D-I) و یا بلافاصله بعد از حلقه اول (D-II) منظور شود (شکل ۲۸). شکل نمایه برای حلقه می تواند مستطیلی، مثلثی، ذوزنقه ای و به شکل های دیگر باشد. چهار متغیر برای بهینه سازی استفاده می شوند: اختلاف ضریب شکست مربوط به مرکز فشرده Δ_1 ، اختلاف ضریب شکست مربوط به Δ_2 شعاع داخلی (R_1) و شعاع خارجی (R_2). در نمونه ای که به روش OVD ساخته شده است، کاهش ضریب شکست مغزی توسط فلئور به عنوان آلاینده انجام می شود و بزرگی سطح



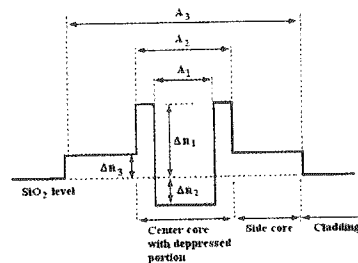
شکل (۲۸): نمایه حلقه دار فیبر NZDSF. نمونه طراحی شده (b)



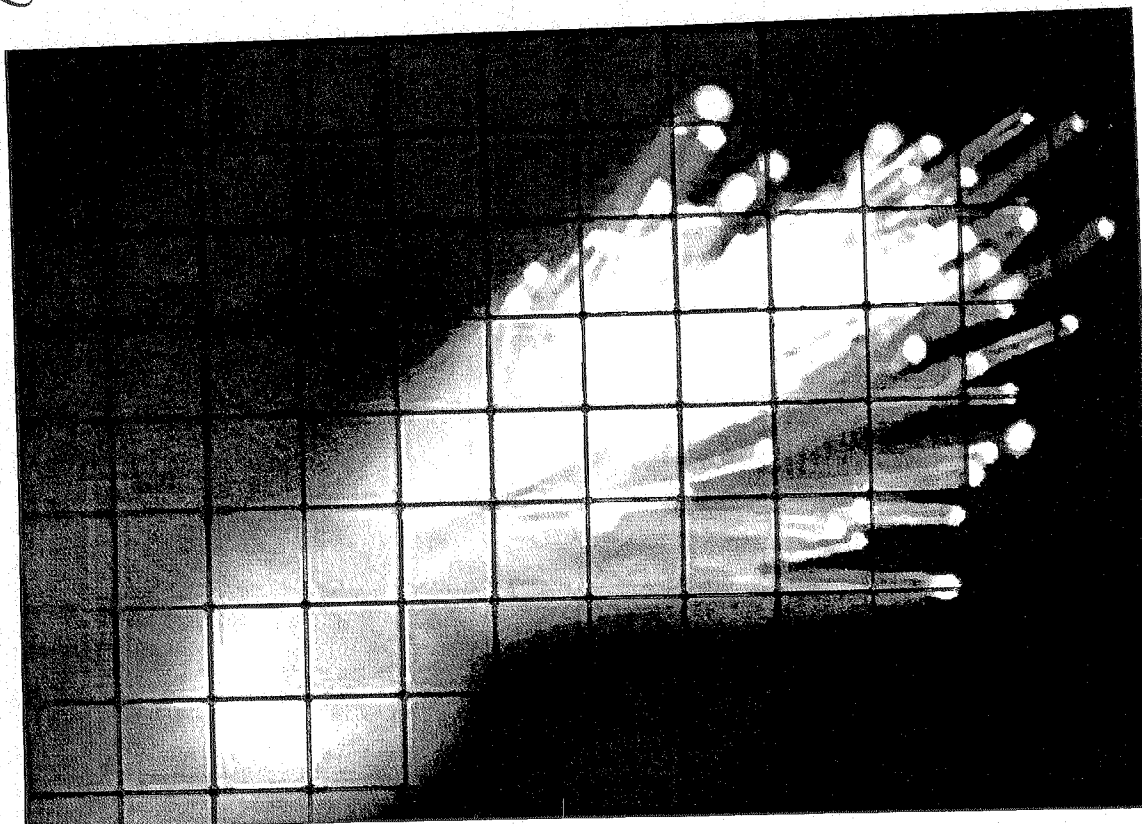
شکل (۲۵): مقایسه اثر SPM برای فیبرهای نوری DSF و NZDSF [۸۷].

۴-۷- فیبر نوری با پاشندگی غیر صفر انتقال یافته با مغزی فشرده در شکل (۲۶) نمونه ای از نمایه ضریب شکست فیبر NZDSF با غلاف فشرده نشان داده شده است [۸۸]، که در آن مغزی شامل یک قسمت مرکزی و یک لبه است. به منظور رسیدن به سطح مقطع مؤثر مفید، ضریب شکست مغزی مرکزی توسط آلاینده فلئور به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است و ضریب شکست لبه مغزی به مقدار اندکی از ضریب شکست غلاف (سیلیکای خالص) بیش تر است. در نتیجه میدان ها به درون غلاف بیش تر نفوذ می کنند و انرژی در سطح گسترده تری منتقل می شود. تلفات خمشی مهم ترین عامل محدود کننده سطح مقطع مؤثر است. در طرح اخیر لبه مغزی برای موازنه کاهش تلفات خمشی و افزایش ناحیه مؤثر در نظر گرفته شده است.

در بررسی شکل (۲۷) مشاهده می شود که هر چقدر اختلاف ضریب شکست لبه مغزی با غلاف کم تر باشد، سطح مقطع مؤثر بزرگ تر خواهد شد، اما تلفات خمشی نیز در یک شعاع انحنای ثابت افزایش می یابد. در نمونه ای از این طراحی که به روش MCVD تهیه شده [۸۸]، در طول موج پاشندگی صفر یعنی ۱۵۵۰ نانومتر، سطح مقطع مؤثر مساوی ۱۴۶ میکرومتر مربع به دست آمده که حدوداً سه برابر سطح مقطع مؤثر DSF معمولی است. اما تلفات خمشی آن با فیبرهای نوری معمولی معادل است (۶ دسی بل بر متر) و PMD آن به میزان ۰/۷ دسی بل بر جذر کیلومتر حتی کم تر از DSF های معمولی است.

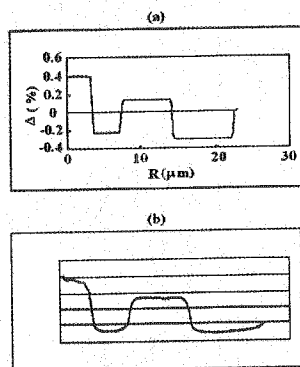


شکل (۲۶): نمایه غلاف فشرده [۸۸].

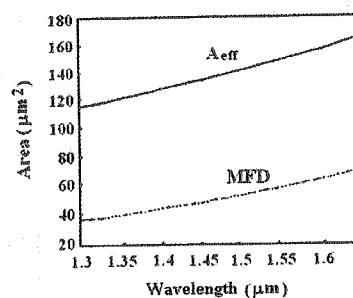


نمونه ساخته شده [۸۹].

اثرات غیرخطی کاهش داده می شود. یک حلقه فشرده در غلاف باعث افزایش پاشندگی موجبری در نتیجه تخت شدن پاشندگی رنگی می شود اما برای مقاومت در برابر تلفات خمشی یک حلقه اضافی نیز مورد نیاز است. همچنین به منظور افزایش طول موج قطع مدهای مرتبه بالاتر، بعد از حلقه دوباره ضریب شکست کاهش داده می شود [۹۰]. پاشندگی در این نمونه در بازه طول موجی ۱۴۵۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر گسترده شده و دارای شیبی در حدود ۰/۱۴ الی ۰/۰۴ پیکونانیه در کیلومتر در مجذور نانومتر است. شکل (۳۱)، منحنی تغییرات پاشندگی فیبر NZDSF پیشرفته با پاشندگی تخت را بر حسب طول موج نشان می دهد. منحنی تغییرات نشان می دهد که از طول موج ۱۴۵۰ تا ۱۶۰۰ نانومتر، مقدار پاشندگی ثابت مانده است.



شکل (۳۰): نمایه فیبر نوری NZDSF با پاشندگی تخت (a) نمونه



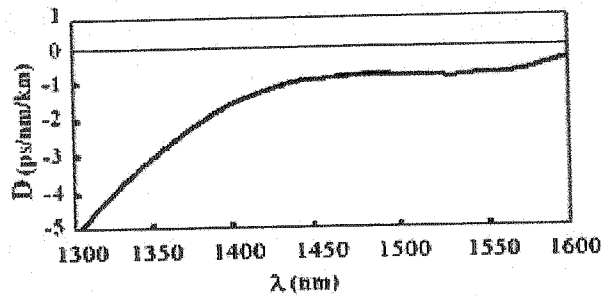
شکل (۲۹): تغییرات سطح مقطع مؤثر و قطر میدان مد نسبت به طول موج [۸۹].

مقطع مؤثر به ۱۲۰ میکرو متر مربع می رسد. در شکل (۲۷) قطر فیبر بر حسب تلفات خمشی با تغییر در Δn_1 در نمایه شکل (۲۶) نشان داده شده است. با کاهش درصد Δn_1 ، قطر فیبر برای تلفات افزایش می یابد. در شکل (۲۹) تغییرات سطح مقطع مؤثر و MFD نسبت به طول موج نشان داده شده است. با افزایش طول موج، سطح مقطع مؤثر به همراه MFD افزایش می یابد.

۸- فیبرهای نوری NZDSF پیشرفته با پاشندگی تخت

در ساختار فیبرهای نوری با پاشندگی تخت وجود یک حلقه فشرده باعث گسترده پاشندگی در یک بازه طول موجی و شیب بسیار کم پاشندگی می شود. نمایه ضریب شکست طراحی و ساخته شده فیبر نوری با پاشندگی تخت غیر صفر انتقال یافته در شکل (۳۰) نشان داده شده است. در این فیبر نوری نیز با افزایش سطح مقطع مؤثر

طراحی شده (b) نمونه ساخته شده [۹۰].



شکل (۳۱): تغییرات پاشندگی نسبت به طول موج در فیبر نوری NZDSF.

۹- جمع بندی

در سامانه های فیبر نوری تلاش بر این است تا با کاهش عوامل محدود کننده، با صرف هزینه کم تر به ظرفیت هایی با کیفیت و کمیت بیش تر دست یابیم. یکی از راه های رسیدن به این هدف استفاده از سامانه های WDM به همراه تقویت کننده های نوری آلائیده با اربیم (EDFA) است. اما این سیستم نیز محدودیت هایی دارد که از آن جمله می توان پاشندگی، نوفه تقویت کننده EDFA و وابستگی بهره آن به طول موج، اثرات غیر خطی، تلفات و غیره را نام برد. مؤلفه های مختلفی که باعث گستردگی پالس انتشاری در فیبر نوری می شوند عبارتند از: پاشندگی ماده، پاشندگی نمایه ضریب شکست، پاشندگی موجبر و پاشندگی مد قطبشی.

در EDFA یک فیبر نوری آلائیده

با اربیم کار تقویت پالس نوری را انجام می دهد. با این تقویت کننده، پالس نوری مستقیماً تقویت می شود و دیگر نیازی به فرایندهای پیچیده تبدیل سیگنال های الکتریکی و نوری به یکدیگر نیست، اما ممکن است پرتوهای خود بخودی ناشی از یون های "با انرژی بالا"، تقویت شده و به همراه پالس منتشر شده و در آشکارساز باعث بروز مشکل در تحلیل داده ها شوند.

تقویت پالس نور در سامانه های WDM و افزایش شدت نور باعث بروز پدیده های غیر خطی می شود که مهم ترین آنها FWM و SPM یا همان آمیختگی طول موج و خود مدولاسیون فاز هستند. افزایش سطح مؤثر فیبر نوری باعث کاهش این اثرات می شود.

مکانیزم های تلفات در فیبرهای نوری تحت تأثیر ساختار موجبر و ترکیبات ماده، روش های آماده سازی و تخلیص آنها قرار

می گیرند. این مکانیزم ها را می توان به صورتی که در جدول (۱) آمده دسته بندی کرد.

جدول (۱): مکانیزم های تلفات در فیبر نوری

تلفات جذبی		تلفات تابشی				
اکتسابی	ذاتی	همبافت	خمشی	پراکندگی		
		۱- طولی	ریز خمش	بزرگ	غیر خطی	خطی
		۲- عرضی		خمش	(بریلیون و رامان)	(رایلی و می)
		۳- زاویه ای				
		۴- اندازه لکه				

پهنای باند قابل توجه فیبرهای نوری تک مد کاربرد آنها را در سامانه های ارتباطات نوری فراگیر کرده و رسیدن به سامانه هایی با ظرفیت های بسیار بالا را امکان پذیر ساخته است. با توجه به اینکه یکی از عوامل های مهم محدود کننده سیستم انتقال پاشندگی است، می توان فیبرهای نوری تک مد را برحسب پاشندگی آنها به گروه های فیبرهای نوری معمولی، با پاشندگی انتقال یافته، با پاشندگی تخت و با پاشندگی غیر صفر انتقال یافته تقسیم کرده و برای هر کدام نمایه های متفاوتی ارائه داد. فیبرهای نوری تک مد معمولی CSF اولین نسل فیبرهای نوری تک مد هستند که در پنجره ۱۳۰۰ نانومتر کار می کنند که پاشندگی کل آن در این پنجره صفر است.

مزیت فیبرهای نوری با پاشندگی انتقال یافته نسبت به CSF استفاده از پنجره کم ترین تلفات یعنی ۱۵۵۰ نانومتر است. بنابراین این نوع فیبرها به طور همزمان دارای حداقل تلفات و حداقل پاشندگی هستند. فیبرهای نوری تک مد با پاشندگی تخت DFF دارای پاشندگی کم در بازه ای از طول موج

هستند.

تعداد متغیرهای کنترل شونده ساخت در این گروه زیاد است، بنابراین دقت در ساخت آنها بسیار مهم است. در فیبرهای نوری با پاشندگی غیر صفر انتقال یافته NZDSF، به منظور کاهش اثرات غیر خطی ناشی از شدت نور، سطح مؤثر فیبر نوری افزایش داده شده است. این گروه فیبر نوری در پنجره طول موج ۱۵۵۰ نانومتر کار می کنند. اولین و ساده ترین نمایه ضریب شکست برای CSF ها به صورت ضریب پله ای طراحی شد. به مرور زمان براساس بهینه سازی متغیرهایی مثل قطر میدان مد، طول موج قطع، تلفات، پاشندگی و شیب آن و نیز سطح مقطع مؤثر، نمایه های متفاوتی در هر نسل طراحی شده اند که در این مقاله نمونه هایی برای هر گروه ارائه و بررسی شده اند.

* منابع و مراجع در دفتر ماهنامه موجود است.