بسمه تعالی

کارگاه مخابرات نوری

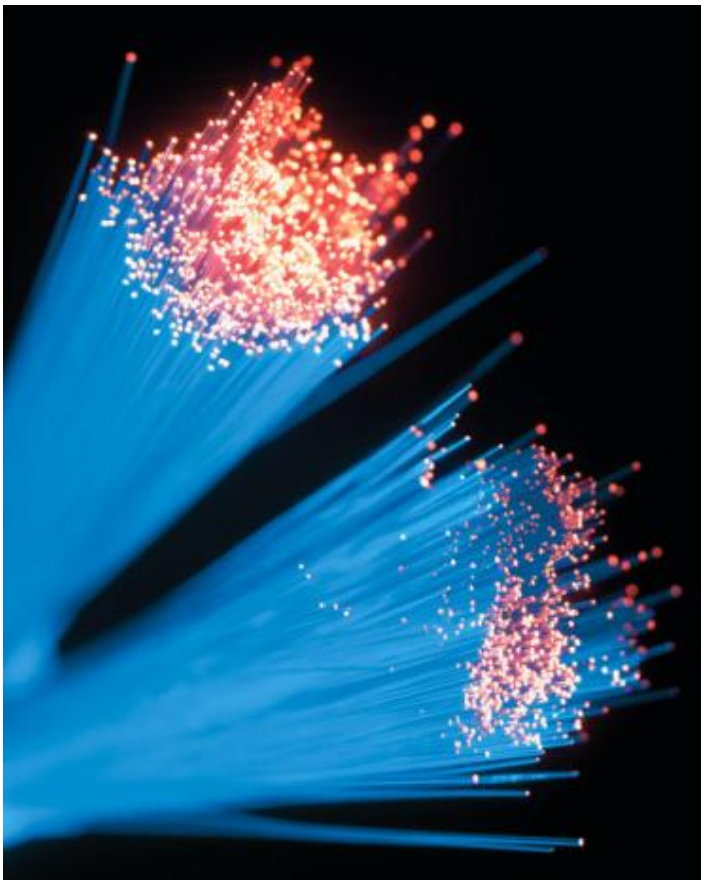
فصل اول

تاریخچه ، مزایا و معایب فیبر نوری

مقدمه

در طول سالهای گذشته شکلهای مختلفی از سیستمهای مخابراتی عرضه شده است و علت اصلی این حرکت و پیشرفت ، ارسال و انتقال اطلاعات و پیامها به فاصله های دورتر و افزایش سرعت انتقال و حجم بیشتری از اطلاعات در واحد زمان که ظرفیت سیستم نامیده می شود ، بوده است .

سیستمهای مخابراتی که تا قرن نوزدهم وجود داشت ، در یک سطح ابتدائی و با ظرفیت بسیار پایین بود . آشنائی بشر با نور به زمانهای بسیار دیرین باز می گردد و حتی می توان گفت که بشر از همان آغاز پیدایش به کمک چشم خود که آشکار ساز نوری بسیارحساس است بوجود نور پی برده است . آتش را می توان یکی از اولین خطوط ارتباط نوری دانست که برای علامت دادن در بین یونانیها و ایرانیان باستان در جنگ متداول بود و معنی و مفهوم آن بستگی به قراردادی داشت که بین ارسال کننده و دریافت کننده گذاشته شده بود .



در دنیای صنعتی و پیشرفته امروزی نیز نمودی از این ایده های ابتدائی به صور مختلف دیده میشود که فانوس دریایی ، چراغ راهنمایی و چراغهای کنترل خودرو ها از این شمار می باشند .

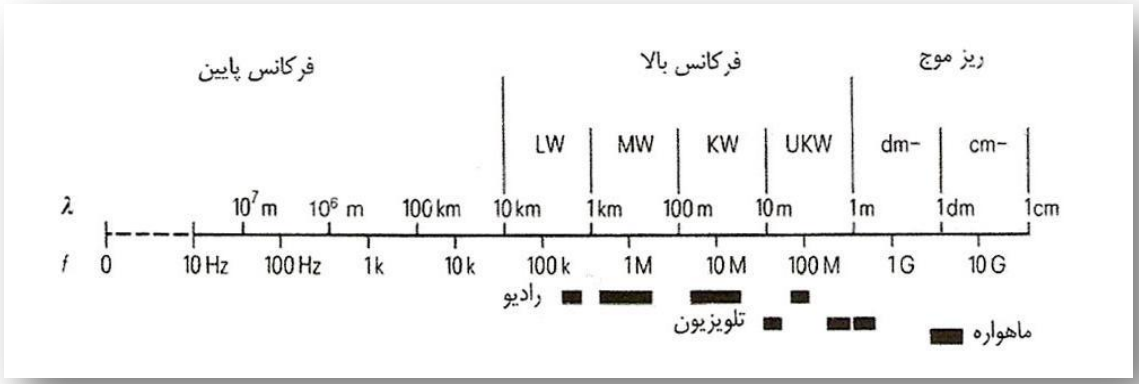
اختراع تلگراف توسط مورس (Morse) در سال 1838 یک واقعه مهّم تاریخی و یک گام جدید در امر مخابرات ، یعنی مخابرات الکتریکی بود که در سال 1844 اولین خط تلگراف با استفاده از سیمهای فلزی برقرار شد .

استفاده از سیمهای و کابلهای فلزی برای انتقال اطلاعات و بعنوان یک کانال انتقال با نصب اولین مرکز تلفن در سال 1878 توسعه یافت و تا سال 1887 که امواج الکترو مغناطیس توسط هرتز (Hertz) کشف شد، سیمها تنها محیط انتقال موجود بودند . اولین سیستم مخابرات رادیوئی در سال 1895 توسط مارکونی (Marconi) ارائه شد .

بخشهای اصلی یک سیستم مخابراتی را بطور بلوک دیاگرام در شکل (1-1) می بینید .

شکل (1-1)

منبع – کانال – گیرنده ، سه رکن اصلی می باشد و بقیه در رابطه با اجزاء سیستم می باشد . در سیستمهای الکتریکی ، معمولاً انتقال اطلاعات پس از تبدیل اطلاعات پس از تبدیل سیگنال اطلاعات به یک موج الکترو مغناطیس که تغییرات سینوسی دارد و به آن موج حامل (Carrier) می گویند . صورت می گیرد و سپس در گیرنده مجدداً اطلاعات از موج حامل باز پس گرفته می شود. در این روش حجم اطلاعاتی که می توان ارسال داشت بستگی مستقیم به فرکانس موج حامل دارد و بطور کلی می توان گفت که هر چه فرکانس موج حامل بیشتر باشد عرض باند یا ظرفیت آن بیشتر است بطور کلی برای بالا بردن انتقال اطلاعات باید سرویس های مخابراتی وسیعی داشته باشیم و برای افزایش پهنای باند ، باید فرکانس را افزایش داد (یعنی طول موج کمتر) . در شکل (1-2) طیف امواج الکترو مغناطیس که برای مخابرات الکتریکی و نوری مورد استفاده قرار گرفته است نشان داده شده است .



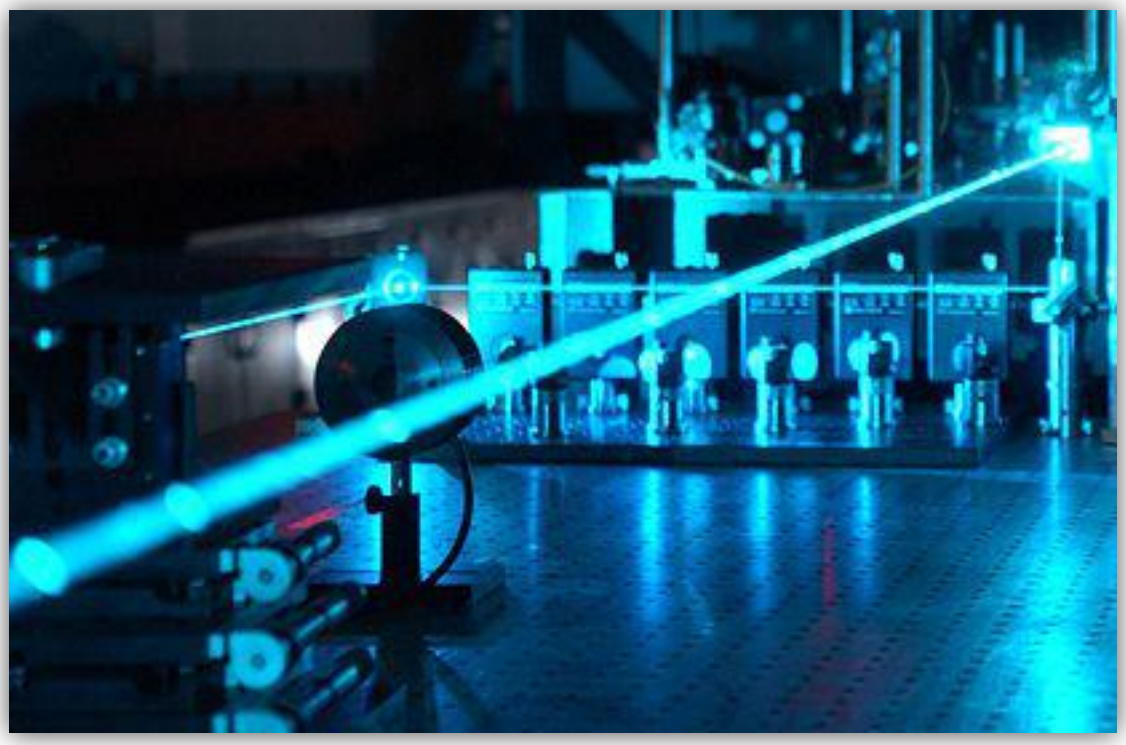
شکل (1-2)

محیط های انتقالی که در طیف شکل (1-2) استفاده شده اند موجبرهای مایکروویو و امواج میلی متری و امواج رادیویی و ناحیه امواج نوری می باشد .

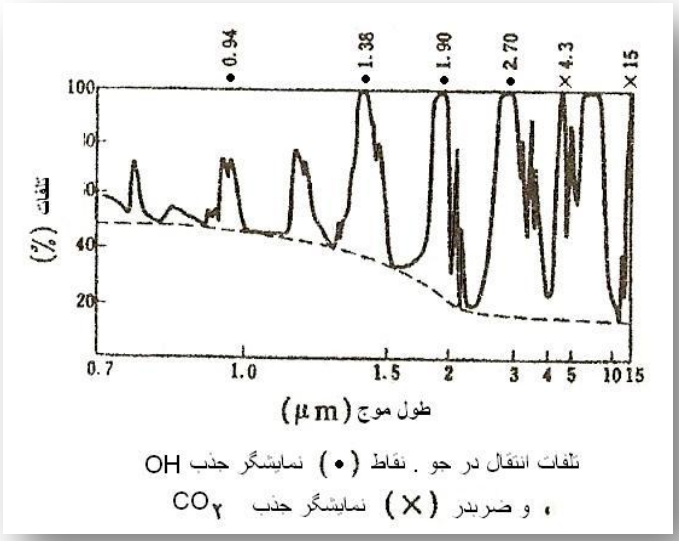
طیف امواج نوری بین 50 نانومتر در ماوراء بنفش تا 100 میکرومتر در مادون قرمز محدود شده است ،که بخشی از آن حدود 400 تا 700 نانومتر ، طیف نورمرئی می باشد فرکانس امواج نوری بین 10^{12} الی 10^{16} هرتز است امواج نوری مانند امواج رادیوئی در دو محیط انتقال هوا و موجبر قابل استفاده است .

در سال 1958 ، تئوری آمپلی فایرهای لیزری ارائه می شود و جایزه نوبل مربوط به این اختراع می شود و دو سال بعد توسط علی جوان ، لیزر عملاً بوجود آمد و با این اختراع در سال 1960 ، منابع تشعشع الکترو مغناطیس همدوسی (Coherent) در دسترس قرار گرفته و باعث گردید تا طیف مرئی قابل استفاده گردد با اختراع لیزر (Laser) و مشاهده اینکه نور منتشره از لیزر شباهت زیادی با امواج الکترو مغناطیس ارسالی از یک فرستنده رادیوئی دارد ، فکر استفاده از لیزر برای انتقال اطلاعات بوجود آمد.

فرکانس نور لیزر در حد 5×10^{14} هرتز است و ظرفیت اطلاعات آن تقریباً 10^5 برابر سیستمهای مایکروویو و معادل 10 میلیون کانال تلویزیونی است .



اولین محیطی که برای انتقال اطلاعات سیستمهای مخابرات نوری مورد استفاده قرار گرفت جو یا اتمسفر بود که به علت اختلالات ناشی از شرایط جوی نظیر رعد و برق و یا بارندگی و شب و روز و سرما و گرما و ... ضریب شکست هوا فرق می کرد و تنظیم لنز عدسی ها بهم می خورد و شدت نور تغییر پیدا می کرد ، در هوا میزان تلفات از نوع جذبی بر حسب طول موج متفاوت است . در شکل (3-1) تلفات انتقال در جو را برای طول موج های مختلف می بینید .

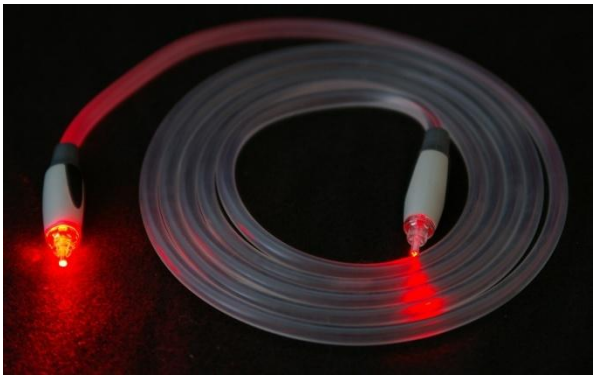


شکل (3-1)

پس از اشکالاتی که در انتقال نور در هوا وجود داشت به فکر استفاده از هدایت نور توسط موجبر شدند .

در تلاشهای اولیه ، اشعه نور در طول مسافت طولانی هدایت گردید و این عمل با بکارگیری عدسی هائی که در لوله مناسبی قرار داده شده بودند انجام شد . بدین ترتیب از تمایل اشعه به پخش در اطراف بر اثر شکست نور ممانعت به عمل آمد . و از ورود شعاعهای نور خارجی و رطوبت بدان جلوگیری به عمل آمد آینه های کروی برای هدایت شعاع نور در خمش ها بکار گرفته شد چنین سیستم هائی نیز به نتیجه مطلوب نرسید زیرا بعلت لرزش زمین و هنگام وقوع زلزله عدسی ها کمی جا به جا شده و در نتیجه مسیر نور تغییر می کرد ضمناً در بالا و پایین لوله هم درجه حرارت متفاوت بود و سبب خمش پرتو می شد و خط انتقال مناسبی نبود در نتیجه استفاده از این سیستم را برای مدت زمانی ، غیر قابل قبول و غیر اقتصادی متصور می ساخت با این ترتیب فکر استفاده از شیشه به عنوان محیط انتقال مطرح گردید .

اولین کاربرد فیبر در تجهیزات معاینه داخلی معده (gastro scope) در پزشکی بود.



اولین فیبر نوری نیمه سخت برای این منظور توسط سه محقق به نامهای(Basil Hirschowitz , C. Wilbur Peters و E .Lawrence Curtiss) از دانشگاه میشیگان در سال 1956 اختراع و ثبت گردید. در طی مراحل توسعه این تجهیزات شرکت Curtiss اولین رشته های شیشه ای پوشیده شده را تولید کرد. در تارهای نوری اولیه از هوا، روغنهای بی اثر و یا موم به عنوان روکش استفاده می کردند. سایر موارد کاربرد انتقال تصویر به تبع این محصول بزودی بوجود آمدند.

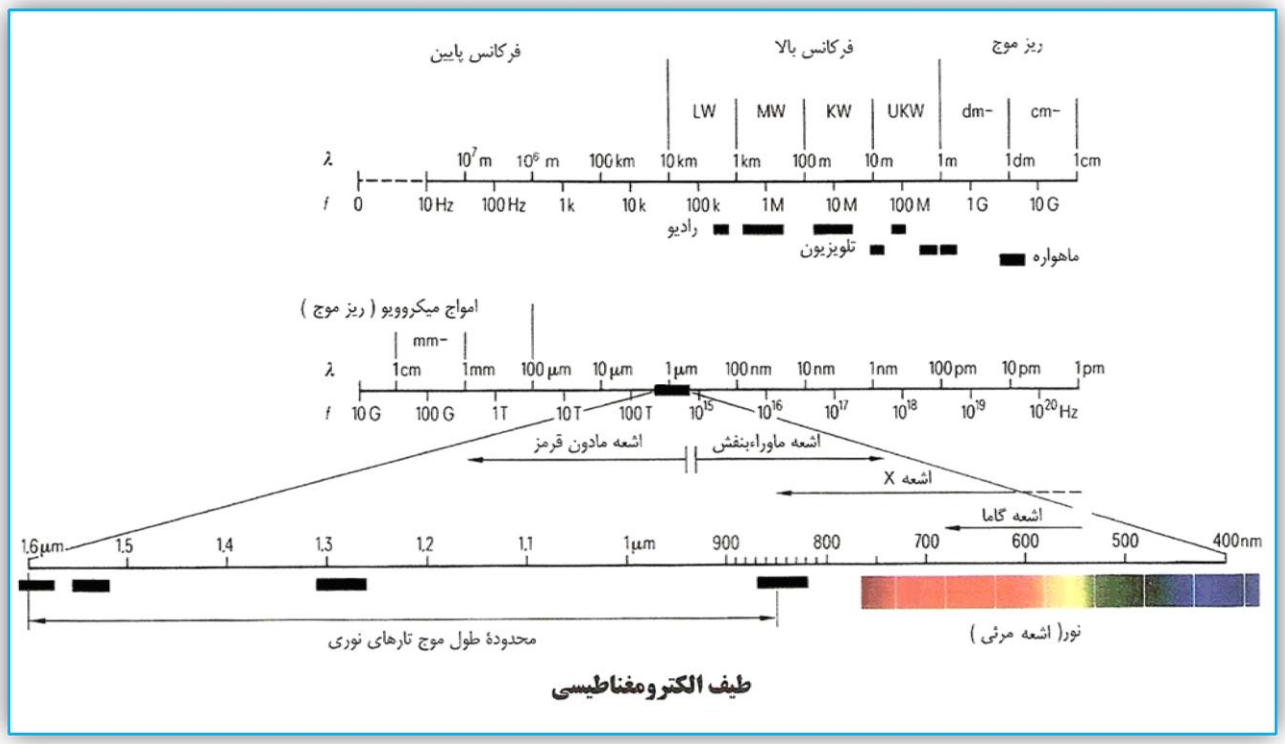
فرضیه استفاده از فیبرهای شیشه ای (Fiber Glass) بعنوان محیط انتقال در سال 1965 در مقاله ای توسط **کائو** (Kao) و **هاکهام** (Hackham) و **ورتز** (Wertz) که در لابراتورهای مخابراتی استاندارد انگلیس کار می کردند عنوان شد. البته شیشه های معمولی قادر به انتقال نور فقط تا چند متر را می باشد و با افزایش ضخامت آن نور درهنگام عبور بشدت تضعیف شده (بیش از 1000 دسی بل در کیلومتر) و مستهلک می گشت .

بعدها در سال 1966 ثابت شد که آن تضعیف زیاد ناشی از کاربرد و انتخاب مواد فیبر شیشه نبوده ، بلکه مربوط به ناخالصی های موجود در فیبر شیشه نظیر آهن و مس و نیکل و سایر فلزات موجود در این مواد می باشد .

در سال 1970 **کاپرون** (Kapron) و **کک** (Keck) و **مورر** (Maurer) و **زیمار** (Zimar) از کارمندان یک شرکت آمریکائی (به نام کورنینگ) موفق به تهیه چند صد متر فیبر تک مُدی با تضعیف 17 dB در هر کیلومتر در طول موج 633 نانومتر شدند که در آن از فناوری تغلیظ سیلیکون با تیتانیوم استفاده شده بود و در پایان سال 1972 فیبرهای چند مُدی با تضعیفی کمتر از 4 dB/kM نیز ساخته شد که پیشرفتی درخور تقدیر بود زیرا چنین تضعیفی معادل با افت ناشی از کابلهای کواکسیال ساخته شده درآن زمان بود .

در سال 1976 دو نفر به نام **Masaharu Horiguchi** از (NTT Ibaraki Lab) و **Hiroshi Osanai** از (Fujikura Cable) موفق به تولید تار باتضعیف کمتر از 0.47 dB/km در طول موج 1.2 میکرومتر شدند .

همزمان با پیشرفت تکنولوژی و اصلاح تکنیک ساخت و دفع معایب موجود و استفاده از طول موج هائی در ناحیه $103^{\mu m}$ و $105^{\mu m}$ مطالعات بسمت دستیابی به سیستمهای انتقال با ظرفیت بالاتر هدایت گردید. همانطور که در طیف الکترو مغناطیس امواج شکل (1-4) مشاهده میشود در نواحی طول موج های (1625و 1550 و 1310 و 850) نانومتر ، که به عنوان پنجره های فیبر نوری شناخته میشوند می توان کمترین تضعیف را در این نواحی بدست آورد .



شکل (4-1)

در سال 1983 فیبرهائی با تضعیف 0.2 dB/kM در طول موج 1550 nm ساخته شد که کمترین تلفات در سیستم مخابراتی است . بطور مثال اگر 0.3 dB/kM تضعیف داشته باشیم پس از طی مسافت 10 Km ، سیستم به اندازه نصف توان اولیه خود را دارا خواهد بود .

فیبر نوری از تمام محیط های انتقالی شناخته شده دارای پهنای باند وسیعتر و افت کمتری می باشد این دو مزیت دو عامل عمده در ارزیابی سیستم های مخابراتی بشمار میرود فیبر نوری که تا چند سال پیش (سال 1980) صرفاً جنبه آزمایشگاهی داشت امروز نه تنها به مرحله تولید و ساخت رسیده بلکه تا پایان سال 1985 در حدود 105 میلیون کیلومتر کابل نوری در سراسر گیتی نصب شده است .

کابل های نوری مانند کابلهای مسی می توانند بصورت هوائی ، کانالی ، خاکی و یا در زیر دریاها نصب شوند ولی بعلت محدودیت هائی که در موقع نصب و یا ساخت کابل بوجود می آید طول کابل نیز محدود خواهد بود .

معمولاً طول کابل نوری برحسب کاربرد آن بین چند صد متر تا چند کیلومتر متفاوت می باشد طولهای کوتاهتر برای موقعی که کابل در کانال کشیده می شود و کابلهای با طول بلندتر بصورت هوائی و خاکی قابل نصب است (حدوداً 2 km) و برای خطوط انتقال بلندتر از طول کابل نوری ، قطعات کابل و فیبر نوری به یکدیگر پیوندزده می شود .

برای اولین بار در امریکا در سال 1983 یعنی بین دو شهر واشنگتن و نیویورک بطول 400 فیبر نوری بعنوان محیط انتقال بکار گرفته شد و در تابستان سال 1984 مورد بهره برداری قرار گرفت در ایران نیز اولین بار در سال 1367 بین تهران و کرج فیبر تک مُدی بطول 45 km با همکاری شرکت زیمنس آلمانی و با افت 0.36 dB / kM در طول موج 1310 nm به صورت کانالی کشیده شد .

فیبر نوری در زمینه زیر دریائی نیز جاذبه زیادی از خود نشان داده است بطوریکه در سال 1988 دو قاره اروپا و امریکا از طریق اولین کابل نوری زیر دریائی که بر اساس تکنولوژی تقویت بهینه لیزر کار می کرد بهم متصل شدند ، با این اقدام بار ترافیکی ماهواره ها نیز کاهش یافت .

درسال 1991، میدانهای نوری کریستالهای فوتونیک منجر به توسعه فیبرهای کریستالی فوتونیک گردید، که نور را به وسیله شکست نور از یک ساختار پریودیک به جای انعکاس درونی کلی، هدایت می کرد. اولین فیبرهای کریستالی فوتونیک در سال 1996 به صورت تجاری در دسترس بودند . این کابلها برای انتقال توان بالای بین قاره ای طراحی شدند، وطول موج آنها بسته به مشخصات، دستکاری و برای کاربردهای مشخص بهینه می شوند.

مشاهدات روزانه نشان می دهد که ارتباطات همواره در حال توسعه بوده و بخصوص در سالهای اخیر تکامل بیشتری یافته و صحنه رقابتی برای کسانیکه دست اندرکار تهیه تسهیلات جدیدی از قبیل سیستم سوئیچینگ و تکنیکهای مدرن انتقال و محیط انتقال در زمینه مخابراتی می باشند ، گشته است . در حقیقت نوع سرویسهای جدیدی که ابداع گردیده استفاده صحیح از پهنای باند مفید و نیز ساختمان شبکه ها که بتدریج پیچیده تر و بفرم دیجیتال تغییر یافته و در دراز مدت بصورت I S D N (Inter grated . Serrice Digital . Network) در خواهد آمد ، موجب گشته که محیط های انتقال مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد که یکی از نتایج این مطالعه در زمینه های محیط های انتقال فیبر نوری می باشد .

شاید با جرأت بتوان گفت که بشر قرن بیست و یکم را که قرن کامپیوتر و مخابرات دانسته اند ، سیستم های مخابرات نوری بعنوان زیر بنای اصلی شبکه های مخابراتی جهانی خود تدارک دیده است .

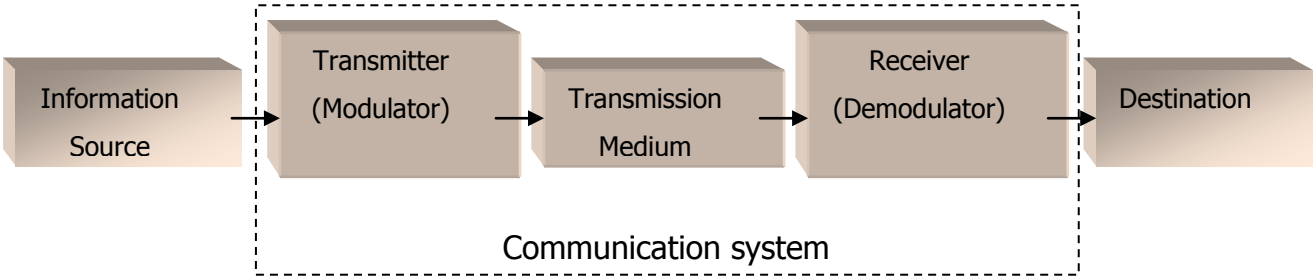
به منظور آشنایی بیشتر باتحولات مخابرات نوری تاریخچه مختصری از آن را در زیر مشاهده می کنید :

سال میلادی	نام مخترع یا مجری	نوآوری
1790	کلود شاپ	سیستم تلگراف نوری
1870	جان تیندال	انعکاس کلی در آب
1876	گراهام بل	اختراع تلفن
1880	گراهام بل	اخذ امتیاز نامه دستگاه فوتوفون (تلفن نوری) جهت انتقال سیگنال صوتی به وسیله نور
1934	نورمن فرنچ	ثبت اولین دستگاه تلفن اپتیکی
1958	آرتور شاولوو ، چارلز تاونز	معرفی و ساخت لیزر
1960	دکتر علی جوان	اختراع اولین لیزر گازی هلیوم – نئون در آزمایشگاه بل
1966	کائو،هاکهام و ورتز	معرفی محیط های انتقال
1970	شرکت کورنینگ	ساخت اولین تار نوری با ضریب شکست پله ای و با افت 17 دسی بل در هر کیلومتر برای طول موج 633 nm
1977	شرکت زیمنس	نصب و راه اندازی اولین شبکه تار نوری در اداره پست آلمان
1992	لامینگ	آزمون عملی تقویت کننده های نوری اربیومی با قدرت 54 دسی بل
1998	شرکت کورنینگ	معرفی و ساخت تارهای نوری NZDS با سطح مقطع موثر زیاد که به نام تارهای LEAF شهرت دارند (با قابلیت ارسال حجم اطلاعات 10gb/s درفاصله 400km بدون ریپیتر در شرایط آزمایشگاه).
1998		ساخت تارهای LWPF به وسیله حذف یون OH^- از تارهای SM
2004	شرکت کورنینگ	ساخت و ارضه اولین دستگاه جوش تار نوری با نام iLID قابل کار در محیط ویندوز XP مجهز به سیستم GPS با قابلیت آموزش و تعمیر و سرویس از راه دور

اجزاء مختلف یک سیستم انتقال فیبر نوری :

تبدیل اطلاعات بشکل انتشار نور در مسیر یک فیبر نوری را میتوان بهترین تعریف از یک سیستم انتقال فیبر نوری دانست .

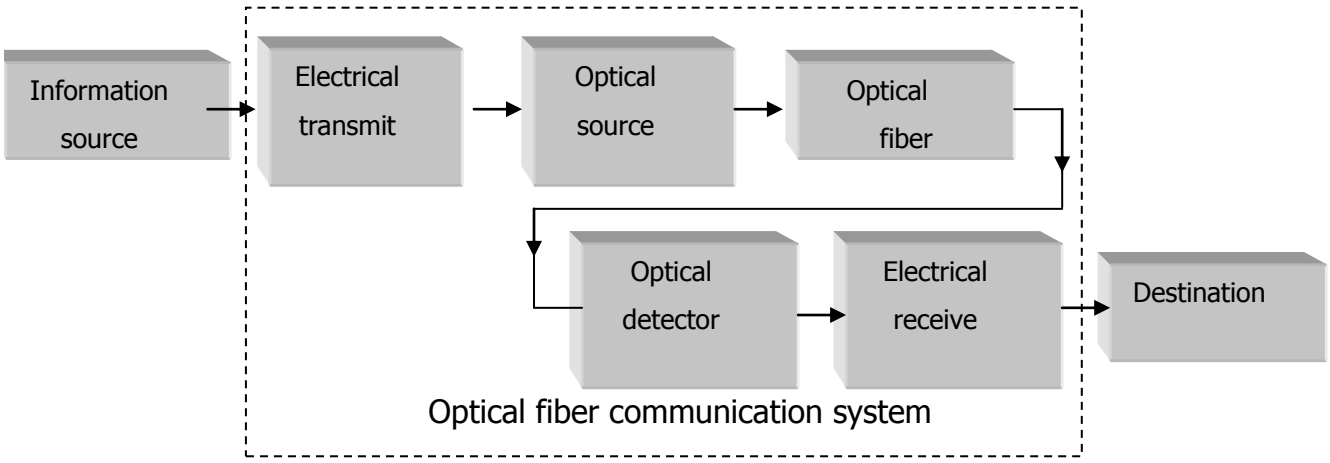
چنانچه در مقدمه ذکر گردید جهت برقراری ارتباط توسط نور ملاء مناسبی نیاز بود که بتواند نوری را که حاصل اطلاعات میباشد انتقال دهد . رشته های نازک فیبر نوری با توجه به ساختمان آنها که بعداً شرح داده خواهد شد محیط مناسبی جهت انتقال امواج نورانی می باشند و می توان با استفاده از یک منبع نورانی در محدوده طول موج های 0.8^{Mm} و 1.7^{Mm} چندین هزار کانال تلفنی را توسط دو رشته فیبر نوری بسادگی منتقل کرد . شکل (1-5) سیمای کلی یک سیستم انتقال را نشان می دهد .



شکل (1-5)

ملاحظه می شود که جهت برقراری ارتباط بین دو نقطه ، سیگنالهای ارسالی از منبع خبر می بایست پس از مدولاسیون توسط عامل انتقال به مقصد رسیده و پس از تفکیک اخبار از طریق دمدولاسیون مورد استفاده قرار گیرد .

در شکل (1-6) اجزاء تشکیل دهنده سیستم ارتباط فیبر نوری را می بیند .



شکل (1-6)

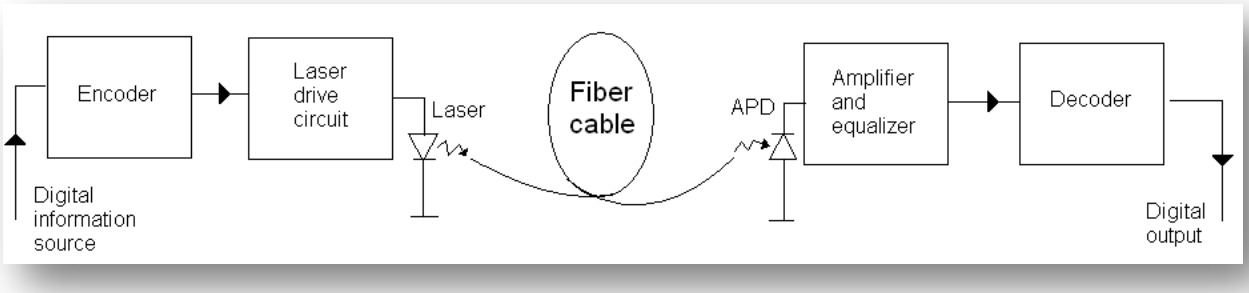
در سیستم ارتباط نوری که در شکل (1-6) مشخص شده منبع خبر سیگنالهای الکتریکی را که همان اخبار می باشد به قسمت الکتریکی فرستنده می فرستد . این قسمت منبع نور را بکار انداخته و مدولاسیون سیگنالهای خبر را بر روی موج نوری سبب می گردد .

منبع نوری متناسب با سیگنال الکتریکی ورودی ، سیگنال نوری خروجی ایجاد می کند که معمولاً لیزر و یا LED می باشد ، سیگنال نوری وارد فیبر نوری می شود که برای حفاظت فیبر نوری از آسیبهائی که ممکن است در موقع نصب و به کارگیری آن وارد شود آنرا با پوششهای مختلف بصورت کابل در می آورند .

در یک رشته کابل نوری معمولاً چند رشته فیبر نوری قرار می گیرد که هر یک از فیبرها یک کانال ارتباطی مستقل محسوب می شود ، کابل نوری ، سیگنال نوری را در مقصد یا در محل تقویت کننده ها (Regenerator) به گیرنده می رساند که گیرنده نیز شامل آشکار ساز نوری و گیرنده الکتریکی می باشد در آشکار ساز نوری ، سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی تبدیل می گردد و جهت این تبدیل از فتودیود pin و ApD استفاده می شود.

سپس آشکار کننده نوری ، سیگنال الکتریکی را به گیرنده الکتریکی داده و بدین طریق دمدولاسیون موج نوری را سبب می گردد . در قسمت گیرنده ، سیگنال الکتریکی تا حد لازم جهت قسمتهای بعدی تقویت می شود .

سیگنال خبری که بر روی موج نوری مدوله می گردند می توانند آنالوگ و یا دیجیتال باشند . در شکل (1-6) سیستم ارتباطی جهت سیگنالهای آنالوگ را نشان دادیم و در شکل (1-7) سیمای کلی یک ارتباط برای انتقال سیگنال دیجیتالی فیبر نوری را می بینید . در سیستم آنالوگ محدودیت مسافت و کم بودن پهنای باند در مقایسه با سیستم انتقال دیجیتال قابل توجه است .



شکل (1-7)

در شکل (7-1) می بینیم که ابتدا اطلاعات دیجیتال بصورت کد درآمده که معمولاً تا Mbit / s 34 بصورت کد HDB_3 و در 140 Mbit / s بصورت کد CMI انجام می گیرد و اطلاعات کد شده به مدار الکتریکی راه اندازنده لیزر منتقل می شوند که این مدار با اطلاعاتی که بصورت کد درآمده اند ، لیزر را به نوسان درآورده و اطلاعات را بر روی نور ارسالی مدوله می کند که پس از انتقال توسط فیبر نوری در مقصد بوسیله APD آشکار شده و پس از گذشتن از طبقه تقویت کننده و متعادل کننده از حالت کد خارج شده . یعنی کد اطلاعات دمدوله شده و در خروجی ، اطلاعات اصلی نظیر آنچه در ورودی سیستم داده شده بود تحویل می گردد .

مزایا و معایب سیستمهای انتقال نوری :

1- پهنای باند بسیار زیاد (Band width) :

فرکانس کاریر این سیستم در محدوده 10^{12} تا 10^{16} هرتز است و در مقایسه با سیستم کابلهای فلزی قابلیت بسیار زیادی را ارائه می دهد فرکانس نور مورد استفاده در این سیستم ارتباطی معمولاً نزدیک به اشعه مادون قرمز و حدود 10^{14} HZ یا 10^{5} GHZ می باشد لازم به یادآوری است که سیستم ارتباط از طریق کابل کواکسیال دارای پهنای باند حدود 500 MHZ و سیستم امواج میلیمتری رادیوئی در حدود 700 MHZ پهنای باند دارد . بنابراین حجم اطلاعاتی که توسط کابلهای فیبر نوری قابل انتقال است خیلی بیشتر از بهترین سیستم کابلهای مسی می باشد . با توجه باینکه در کابلهای کواکسیال هنگامیکه فرکانس از 100 MHZ بیشتر شود انتقال تنها در مسافت چند کیلومتر امکان پذیر است .

2- تضعیف بسیار کم (Attenuation) :

تضعیف بسیار کم فیبرهای نوری از امتیازات مهم آن بشمار می رود و این فیبرها را در مسافت زیاد بدون استفاده از ریپیتر میتوان مورد استفاده قرار داد . تضعیفی در حدود 0.2dB / km در مورد فیبرهائی که هم اکنون بطور معمول مورد استفاده قرار می گیرند وجود دارد . تضعیف در طول موجهای مختلف متفاوت است و بستگی به عوامل زیادی دارد که در بحث مربوط به تضعیف مفصلاً شرح داده خواهد شد ولی در طول موجهای 1600-1100 نانومتر کمترین تضعیف بدست آمده است مثلاً در طول موج 1.55μm تضعیف 0.2 dB / km و در طول موج 1.3 μm تضعیف حدود km / 0.3 dB را داریم .

3- وزن کم و قطر کوچک (Small size and weight) :

مزیت دیگر ، کوچک بودن قطر کابل که باعث کمتر اشغال نمودن کانال می گردد . قطر رشته های فیبر نوری در حدود قطر موی سر بوده و هنگامیکه تعدادی از این رشته ها بطور مجتمع در یک پوسته قرار می گیرد و بعنوان کابل مورد استفاده می شود باز هم قطر بسیار کمی را دارا خواهد بود .

قطر فیبرها با توجه به نوع آنها متفاوت است مثلاًبرای فیبر تک مُدی قطر هسته بین (3-12) میکرومتر و قطر پوشش (غلاف) بین (50-125) میکرومتر می باشد و بطور کلی با توجه به قطر کم دارای وزن بسیار کمی نیز می باشند که طول زیادی از کابل روی یک قرقره بسته می شود و به سادگی حمل می گردد. اگر یک مقایسه نسبی بین فیبر نوری و کابل مسی داشته باشیم ، 40 کیلومتر فیبر نوری دارای وزنی معادل 1 kg است در صورتیکه 1.5 کیلومتر سیم مسی با قطر 0.32 میلی متر دارای وزن 1 kg می باشد (یا از دیدی دیگر 1_g شیشه برابر با 10_{kg} مس است). هم چنین در هواپیما که وزن کم اهمیت ویژه ای دارد از فیبر نوری می توان استفاده کرد . بطور مثال در هواپیمای جنگی میراژ 2000 حدود 16 km فیبر نوری بکار رفته است .

4- ایزولاسیون کامل الکتریکی (Electrical Isolation) :

عدم تأثیر جریانات القائی الکتریکی بر روی موج برهای نوری فیزیکی از خواص مهمّ فیبر نوری می باشد . میدان های ناشی از تشعشع کابلهای برق تاثیری بر این موج برها ندارد و می توان رشته های سیم مسی را هم در کابل نوری پیش بینی کرد و برق مورد نیاز تقویت کننده های بین راه را از این طریق تأمین کرد و یا میتوان خطوط فیبر نوری را در روی دکلهای برق فشار قوی نصب کرد .

5- مصونیت در برابر تداخل و هم شنوائی (Immunity to interference and crosstalk) :

امواج الکترو مغناطیسی و امواج با فرکانس رادیوئی اثری بر روی کابل های فیبر نوری ندارند بنابراین سیستم ارتباطات نوری در مقابل محیط آلوده به نویز مصون بوده علاوه بر این کابلهای فیبر نوری که در مجاور هم هستند نیز بر روی یکدیگر اثرات القائی ندارند و بر خلاف کابلهای مسی ، پدیده کراستالک درآنها بسیار ناچیز است و در تجهیزات نظامی که مسئله تداخل با دیگر امواج الکترو مغناطیس اهمیت دارد بسیار کاربردی است . طبیعت عایق فیبر نوری امکان هر نوع تداخل را از بین می برد و در فیبر نوری نگرانی از اتصال به زمین برای موجبر وجود ندارد .

6- امنیت سیگنال (Signal security) :

نوری که از فیبرها ی نوری عبور می کند فاقد پدیده تشعشع بوده و بنابراین اطلاعات ارسالی از طریق سیستم ارتباطات فیبر نوری در مسیر انتقال قابل بهره برداری و استفاده های استراق سمع نمی باشد و برای مقاصد نظامی ایده آل می باشد .

7- فراوانی و ارزان بودن مواد (Potential low cost) :

یکی دیگر از مزایای فیبر نوری این است که ماده اولیه آن شیشه سیلیکا است و آنرا در همه جا می توان یافت . چرا که منبع اصلی سیلیکا ، سنگ و شن و ماسه است ، در نتیجه قیمت کابلهای فیبر نوری بسیار ارزانتر از کابلهای مسی تمام می شود .

8- نگهداری آسان (Easy of maintenance) :

با توجه به تضعیف کم این کابلها نیاز کمتری به وجود ریپتر در طول مسیر می باشد . یعنی فاصله تکرار کننده ها نسبت به سیستم های کابل های مسی بیشتر است و در نتیجه تعمیرات این کابلها ساده تر و با هزینه و دقت کمتری انجام پذیر است و چون تعداد مفصلها نسبت به کابل مسی کمتر است و هر مفصل مقداری تضعیف داریم در نتیجه خرابی کمتر و نصب نگهداری آسانتر می باشد . طول هر کابل فیبر نوری در حدود چندین کیلومتر می باشد .

9- ظرافت و قابلیت انعطاف (Ruggedness and Flexibility) :

ظرافت و قابلیت خمش این رشته های موئین ضمن بوجود آوردن تسهیلاتی در امر جا به جائی و انبار نمودن و کابلکشی ، وجود روکش های محافظ را جهت این کابلها شایسته اهمیت می سازد ، و نیز در موارد متفاوتی نظیر دوربین های دیجیتال با موارد کاربردی خاص مانند: عکس برداری پزشکی ، لوله کشی و ...استفاده می گردد.

10- مصونیت در مقابل عوامل جوی و رطوبت :

فیبرهای نوری در محیط های مرطوب و در درجه حرارت های ($-40^{\circ}c$ تا $+80^{\circ}c$) بازدهی خود را از دست نمی دهد .

11- و مواردی دیگر مانند :

- ✓ قابلت نصب در محیط های محتوی مواد شیمیایی .
- ✓ مقاومت بالای آنها در برابر خورندگی .
- ✓ پایداری مکانیکی در مقابل لرزش و ضربه .
- ✓ عمر طولانی (به مدت 25 سال سرویس دهی وکارکرد آن تضمین میشود و حال آنکه ماهواره های مخابراتی دارای عمر کارکردی حدود 10 سال می باشد) .
- ✓ مصرف برق پایین . (با توجه به این که سیگنال ها در فیبر نوری کمتر ضعیف می گردند ، بنابراین می توان از فرستنده هائی با میزان برق مصرفی پایین تری نسبت به فرستنده های الکتریکی استفاده کرد.)
- ✓ غیر اشتعال زا. (با توجه به عدم وجود الکتریسیته، امکان بروز آتش سوزی وجود نخواهد داشت .)

لازم به ذکر است علیرغم برتری های اشاره شده در بالا کاربرد تارهای نوری در شبکه های مخابراتی نیاز به دقت فناوری و تخصص دارد که در این راستا می توان به نکات زیر اشاره نمود :

1- طراحی و ساخت وتولید تارهای نوری بسیار هزینه بر است .
2- زاویه انحنای رشته های فیبر باید از حد معینی بیشتر نشود (مثلاً اگر قطر انحنای آن از 10 سانتی متر کمتر شود تضعیف بسیار بالا میرود) .
3- کشش بیش از حد مجاز که مقدار آن برای کابلهای با ظرفیت مختلف فرق می کند نباید از حد معینی بیشتر شود .
4- ساخت و کاربرد تجهیزات ارسال ودریافت سیگنالهای اپتیکی نیاز به تکنولوژی دارد .
5- تطابق شبکه وسیستم انتقال بایستی مد نظر قرار بگیرد .
6- اتصالات تارهای نوری نیاز به فن آوری خاصی دارد .
7- ظرافت تارهای نوری آن را در مقابل حوادث واتفاقات آسیب پذیر تر کرده است .
مثلا کابلهائی که از داخل حوضچه ها عبور می کنند باید کاملاً حفاظت شده باشند و گروههای کابل کش باید با دقت متوجه این کابلها باشند و نباید ضربه به این کابلها وارد شود و یا برای بالا و پایین رفتن از حوضچه پا روی آنها بگذارند .

فصل دوم

مباحث پایه در فیبر نوری

مبانی فیبر نوری

فیبر نوری یك موج بر عایق است که در فرکانس های نوری کار می کند و به شکل استوانه می باشد. انرژی الکترومغناطیس به صورت نور در بین سطوح آن هدایت شده و نور موازی با محور فیبر منتشر می گردد. خصوصیات انتقال در یك موج بر نوری، به مشخصات ساختمانی آن بستگی دارد. به عبارت دیگر ساختمان فیبرنوری تعیین کننده ظرفیت اطلاعات و همچنین میزان اعوجاج فیبر است.

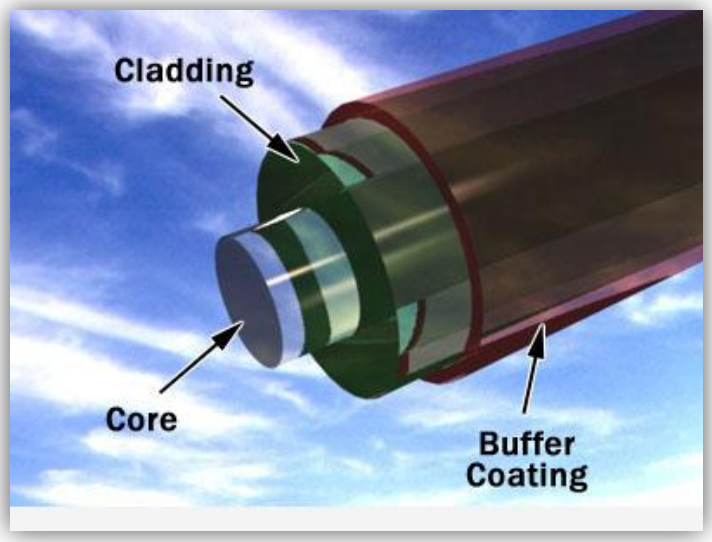
ساختمان فیبر نوری:

۱. هسته (Core) : رشته بسیار نازك استوانه ای شکل، جامد و عایق به شعاع a و ضریب شکست n1 که مغزی فیبر نامیده می شود و معمولاً از شیشه ساخته می شود.

۲. غلاف (Cladding) : هسته فیبر توسط یك لایه جامد و عایق به نام غلاف یا ضریب شکست n2 و قطر(d) احاطه می شود، به طوری که n1 > n2 است.

۳. غلاف باعث می شود که تلفات پراکندگی ناشی از پیوستگی های مغزی ، کاهش پیدا کرده و ثانیاً تحمل مکانیکی فیبر افزایش یابد و ثالثاً از ورود و جذب عوامل خارجی به سطح هسته جلوگیری به عمل آید.

۴. پوشش (Coating): برای حفاظت فیبر در مقابل تنش های مکانیکی و ممانعت از تغییر شکل فیبر و جلوگیری از خراشیدگی سطح فیبر، آن را در یك لایه ای به نام " پوشش " قرار می دهند.



انواع تارهای نوری:

با تغییر در ترکیب مواد مربوط به هسته دو نوع فیبر ساخته می شود:

۱. فیبرهای نوری با ضریب شکست پله ای

۲. فیبرهای نوری با ضریب شکست تدریجی

فیبرهای نوری با توجه اشعه ای که از آن ها عبور می کند نیز به دو بخش تقسیم می شوند:

۱. فیبرهای نوری تك مدی

۲. فیبرهای چند مدی

ـ فیبر های نوری تك مدی، فیبرهایی هستند که تنها یك شعاع نورانی را از خود عبور می دهند.

ـ فیبرهای نوری چندمدی، فیبرهایی هستند که قادر به انتقال یك دسته اشعه نوری می باشند.

با توجه به دو نوع تقسیم بندی فوق (از نظر نوع هسته و از نظر نوع اشعه عبوری) فیبرها به چهار دسته اصلی و کلی تقسیم می شوند:

۱. فیبرهای نوری تك مدی با ضریب شکست پله ای

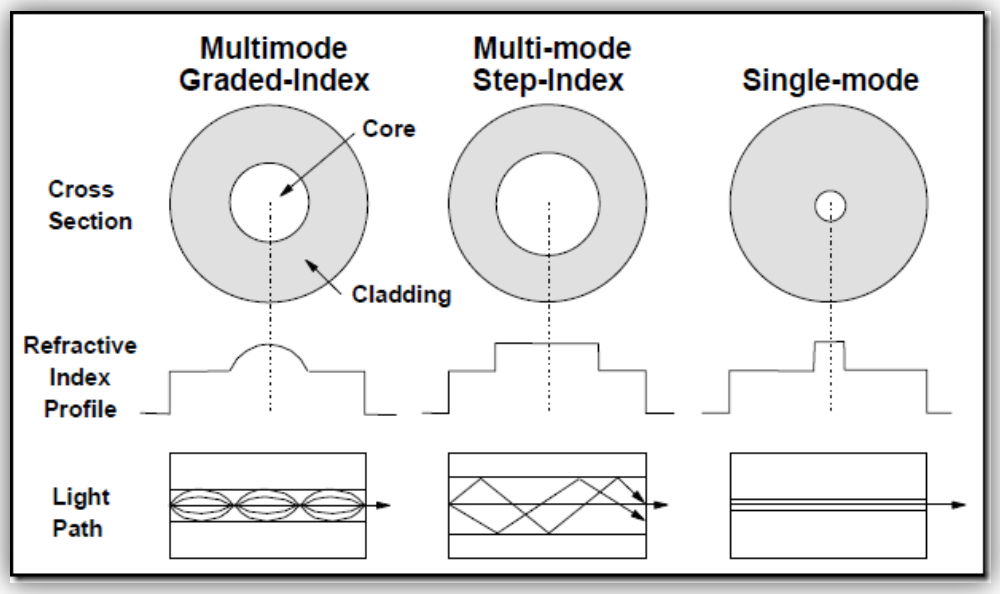
۲. فیبرهای نوری چند مدی با ضریب شکست پله ای

۳. فیبرهای نوری تك مدی با ضریب شکست مرحله ای

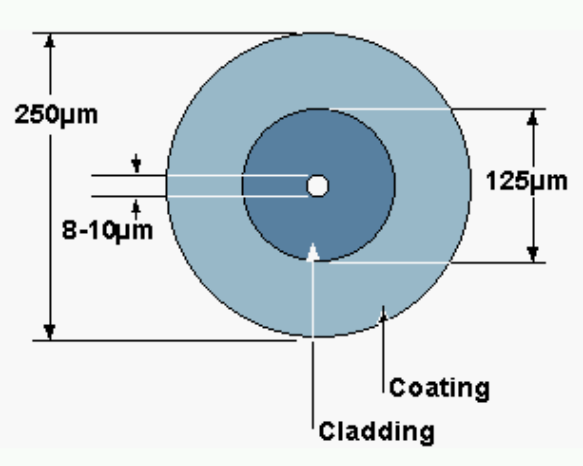
۴. فیبرهای نوری چند مدی با ضریب شکست مرحله ای

که عملاً حالت دوم و سوم کاربردی در مخابرات ندارد و ساخته نمی شود .

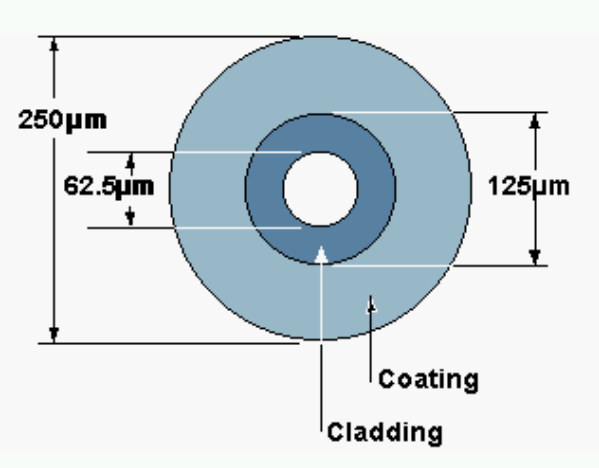
در سیستم مخابرات ایران از فیبرهای نوع اول یعنی فیبرهای نوری تك مدی با ضریب شکست پله ای استفاده می شود .



From Computer Desktop Encyclopedia
© 1999 The Computer Language Co. Inc.



From Computer Desktop Encyclopedia
© 1999 The Computer Language Co. Inc.



حال به بیان چند اصطلاح می پرداریم :

تعریف موج :

انتشار حالت و یا وضعیت تحریک محیط را، بدون آنکه ماده تشکیل دهنده آن جابهجا شود ، موج مینامند ، مانند امواج صوتی و یا امواج ایجاد شده در آب . در موجبرهای نوری، فوتونها عامل انتقال و انتشار امواج الکترومغناطیسی میباشند .

طول موج (Wavelength) :

فاصله یک نوسان کامل را طول موج میگویند. طول موج (λ) از رابطه زیر بدست میآید.

$$\lambda = (c / n) T = c / n . f \quad \Longrightarrow \quad f(Hz) = c (m/s) / n . \lambda (m)$$

که درآن n ضریب شکست و c سرعت سیر نور در خلأ میباشد. با توجه به این فرمول میتوان گفت که فرکانس کار لیزرها در طول موج مورد استفاده مخابرات نوری در فاصله 1/4 الی 1/8 میلیون گیگا هرتز میباشد .

ضریب شکست :

نسبت کاهش سرعت سیر نور یا امواج الکترومغناطیسی در یک محیط به سرعت آن در خلأ را ضریب شکست محیط مینامند . ضریب شکست هر محیط عدد ثابتی نبوده و بستگی به طول موج سیگنال دارد به طوریکه با افزایش طول موج، ضریب شکست کمتر گردیده و به عبارت دیگر سرعت سیر سیگنال بیشتر خواهد شد.

انعکاس نور :

هنگامیکه نور به فصل مشترک دو محیط میتابد، درصدی از آن منعکس میگردد. میزان نور منعکس شده به زاویه تابش بستگی دارد .

انکسار نور :

چنانچه پرتوی از محیط رقیقی (مانند هوا) با زاویه تابش α به محیط غلیظ تری (مانند شیشه یا مایع) وارد شود، جهت آن تغییر کرده و با زاویه β شکسته میشود .

رابطه بین زاویه پرتوهای تابش و شکست مطابق قانون اسنل به صورت زیر نوشته می شود:

$$Sin\alpha / sin\beta = C_1 / C_2$$

که در آن:

α : زاویه تابش

β : زاویه شکست

C_1 : سرعت سیر نور در محیط 1

C_2 : سرعت سیر نور در محیط 2

میباشد.

منظور از محیط با غلظت بیشتر، محیطی است که در آن سرعت نور کاهش مییابد. در صورتی که سرعت نور در هوا را تقریباً برابر سرعت سیر نور در خلأ فرض کنیم و آنرا با حدوداً 300000 کیلومتر در ثانیه است نشان دهیم، که فرمول زیر برای ضریب شکست هر محیط بدست میآید:

$$Sin\alpha / sin\beta = C_0 / C = n$$

برای دو محیط مختلف با ضریب شکستهای n_1 و n_2 و سرعتهای سیر نور C_1 و C_2 روابط زیر برقرار میباشد:

$$C_0 / n_1 = C_1 \quad و \quad C_0 / n_2 = C_2$$

که بر اساس آن شکل دیگری از قانون شکست اسنل به صورت فرمول زیر نشان داده خواهد شد :

$$Sin\alpha / sin\beta = C_1 / C_2$$

به عبارت دیگر، نسبت سینوس زاویه تابش به سینوس زاویه شکست برابر است با نسبت عکس ضرایب شکست دو محیط. .

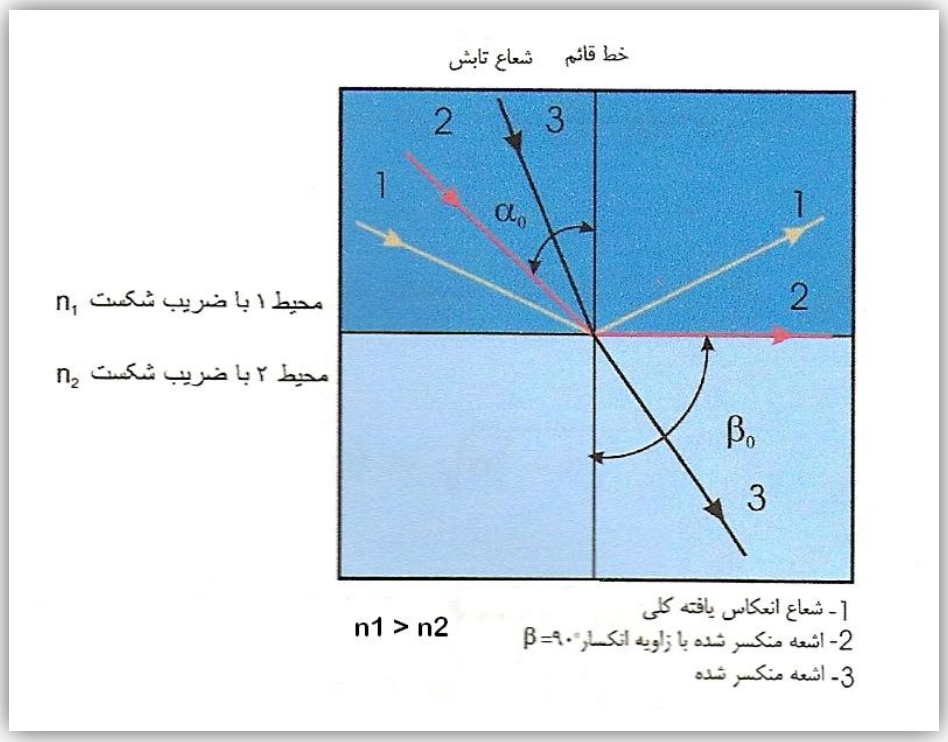
انعکاس کلی داخلی :

هنگامیکه پرتو نوری از محیط غلیظ تری با ضریب شکست n_1 به فصل مشترک آن با محیط رقیقتری با ضریب شکست n_2 میتابد ، به تدریج که زاویه تابش α افزایش یابد ، زاویه شکست نیز زیاد تر شده تا زمانیکه برای مقدار α_0 که زاویه بحرانی خوانده میشود اندازه زاویه شکست β به 90 درجه برسد.

در این حالت پرتو نوری منکسر شده، در فصل مشترک دو محیط انتشار خواهد یافت. مقدار زاویه بحرانی α_0 از فرمول زیر بدست میآید:

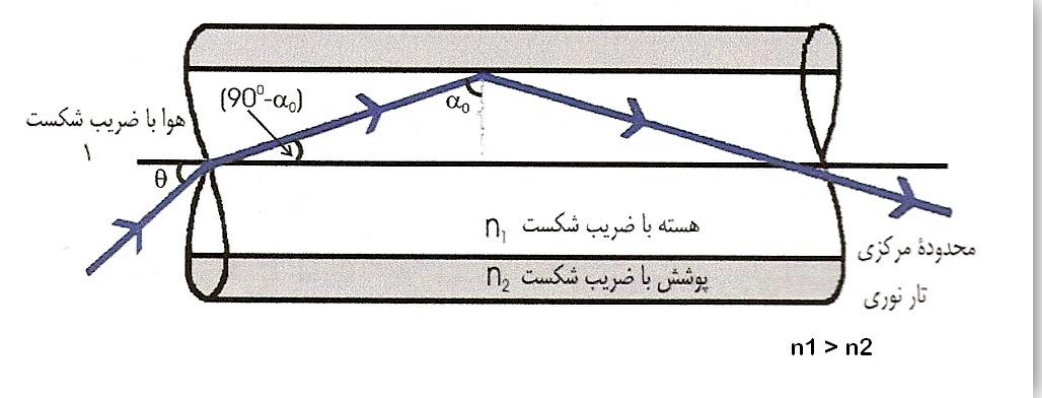
$$\sin\alpha_0 = n_2 / n_1$$

با توجه به فرمول فوق، زاویه بحرانی به نسبت ضرایب شکست n_1 و n_2 دو محیط بستگی دارد. در شکل زیر زاویه بحرانی برای انکسار پرتوها در فصل مشترک دو محیط و یا انعکاس کلی داخلی نشان داده شده است.



دهانه دریافت یا گشودگی عددی :

از پدیده انعکاس کلی در موجبرهای نوری که دارای هسته شیشهای با ضریب شکست n_1 و پوشش شیشهای با ضریب شکست n_2 میباشد، استفاده کرده و زاویه دریافت نور را در تارهای نوری محاسبه میکنند.



برای ورود نور از محیط خارج (هوا با ضریب شکست $n_0 = 1$) به داخل هسته ، میتوان زاویه θ ورودی را مطابق قانون انکسار تعیین کرد :

$$\sin\theta / \sin(90^0 - \alpha_0) = n_1 / n_0$$

و بنابراین:

$$\sin\theta = n_1 \cos\alpha_0 = n_1\sqrt{1 - sin^2\alpha_0}$$

با توجه به رابطه زاویه بحرانی نتیجه میگیریم که:

$$\sin\theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

حداکثر زاویه ورودی θmax را زاویه پذیرش تار نوری میگویند که فقط به ضرایب شکست n_1 و n_2 بستگی دارد. سینوس زاویه پذیرش را، دهانه دریافت NA و یا گشودگی عددی تار نوری مینامند.

این کمیت به خاطر تأثیر بر بهره حجم هدایت نور منبع به داخل تار نوری و نیز افت جوش تارهای نوری که در اثر عدم همترازی بوجود آمده است ، از اهمیت ویژهای برخوردار میباشد.

$NA = \sin\theta max$ و $NA \simeq n1\sqrt{2\Delta}$

که در آن Δ از رابطه زیر بدست میآید :

$$\Delta \simeq (n_1 - n_2) / n_1$$

از این رو، پدیده انعکاس کلی داخلی زمانی در یک موجبر نوری رخ میدهد که موج تابیده شده به آن تحت زاویه خاصی بوده تا پس از ورود به هسته در طول تار نوری انتشار یابد.

این موجها عمدتاً دارای شکلهای خاصی بوده که به هر کدام از آنها که قادر به انتشار در موجبر نوری میباشد، مد میگویند.

تعریف مد وبررسی مدهای انتشار یافته در تارهای نوری :

اگر از نحوه توزیع شدت نور در داخل تارهای نوری تصویر برداری نمائیم، هر شکل خاصی از تصویر بیانگر یک مد انتشار یافته در آنست .

از آنجا که امواج الکترو مغناطیسی از سه فرضیه نور هندسی ، نور موجی و مکانیک کوانتوم پیروی می کنند ، در مورد انتشار امواج درداخل تار نوری بایستی غیر از انتشار خطی و هندسی نور به معادلات ماکسول نیز توجه داشت .

بر اساس فرضیه موجی بودن نور که مبانی آن را معادلات ماکسول بیان می کند ، برای ایجاد امواج با دوام در داخل تار نوری شرایط حدی معادلات ماکسول بایستی لحاظ شود .

بر این اساس پاره ای از شعاع های تابشی واقع در مخروط نور قابل انتشار نبوده وخود به خود حذف میگردد با عنایت به مبانی ریاضیه معادلات ماکسول و قوانین فیزیکی گر چه انتشار نور در داخل تار نوری شامل دو میدان مستقل الکتریکی ومغناطیسی عمود بر هم می باشد وهر میدان از سه مولفه در جهت محور های مختصات تشکیل شده است ، ولی با توجه به شرایط حدی موجبر وخصوصیات تارهای نوری ، در صورتیکه موج الکترو مغناطیسی تنها در جهت محور Z انشار یابد ، میدانی در امتداد این محور یا نخواهد داشت و یا اینکه مقدار ان در مقایسه با سایر محورها ناچیز است و به عبارتی دیگر ($Hz \approx 0$ و $Ez \approx 0$) می باشد .

با توجه به این فرضیه ، امواج الکترومغناطیسی منتشر شده در تار نوری را میتوان امواج متحرکی قلمداد کرد که دارای دو میدان الکتریکی و مغناطیسی متغیر عمود بر هم واقع در سطح مقطع تار نوری بوده و در جهت محور عمود بر دو میدان تشکل دهنده فوق حرکت می - کنند . مثلاً اگر جهت انتشار را محور تار و یا Z در نظر بگیریم ، صفحه XZ حاوی میدان الکتریکی و XZ میدان مغناطیسی را شامل میشود .

هر حالت انتشار امواج در یک تار نوری، مد خوانده شده و هر مد دارای شکل خاص مربوط به خود بوده که حامل مقدار معینی انرژی میباشد.

به طوری که اگر از شکل توزیع نور در مقطع تارهای نوری تصویر برداری نمائیم، هر شکل خاصی از تصویر نور بیانگر یک مد انتشار یافته در آن است.

هر منبع نوری میتواند چندین مد را به داخل تار نوری انتقال داده که در مرحله اولیه تشکیل ، هر مد حامل انرژی بسیار کم و یا بسیار زیاد میباشد.

به خاطر اختلاف کم ضریب شکست هسته و پوشش ($n_1 - n_2 \lll n_1$) ، انرژی مدهای مختلف در طول انتشار به یکدیگر منتقل شده تا ضمن رسیدن به حالت پایدار، هر مد انرژی خاص خود را انتقال دهد. در تارهای سیلیکایی این امواج پس از طی مسافت چند صد متر و یا یا کیلومتر به حالت پایدار میرسد.

- از نقطه نظر شکل و منحنی توزیع میدانهای اصلی در داخل تار نوری چهار نوع مد به نام های TE، TM ، HE و EH وجود دارد.

مد TE فقط دارای میدان الکتریکی در جهت انتشار میباشد.

مد TM فقط دارای میدان مغناطیسی در جهت انتشار میباشد.

- مدهای هایبرید HE و EH دارای هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی در جهت انتشار می باشند ولی در مد HE میدان مغناطیسی قوی تر از میدان الکتریکی بوده و برعکس در مدهای EH شدت میدان الکتریکی نسبت به میدان مغناطیسی قوی تر است.

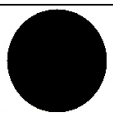
به خاطر اختلاف کم ضریب شکست هسته و پوشش، ثابت انتشار تعدادی از میدانها یکسان بوده و در طول انتشار بر هر اثر میگذارند.

مثلاً زوج مدهای $HE_{k+1,m}$ و $EH_{k-1,m}$ دارای ثابت انتشار یکسان و گروه مدهای $HE_{2,m}$ ، $TE_{0,m}$ ، $TM_{0,m}$ نیز شرایط یکسانی از نظر ثابت انتشار دارند.

از تأثیر متقابل این میدانهای همر گروه، میدانهای جدیدی پدیدار شده که به صورت بردارهای موازی در سطح مقطع تار نوری قرار گرفته که به آنها امواج قطبی شده خطی (Linearly Polarized) میگویند. این مدها به شکل نور نشان داده شده و در داخل تارهای نوری قابل اندازهگیری میباشند.

مدهای اخیر با نام کلی LP_{1m} شهرت داشته و اندیش 1 و m مشخص کننده مد اصلی و یا مرتبه مدهای فرعی ردیفهای بعدی میباشد. اندیس m تعداد حلقههای روشن و اندکس 1 تعداد برش بوجود آمده در حلقهها و یا نصف تعداد نقاط روشن را نشان میدهد. مد اصلی انتشار یافته در داخل هسته تارهای نوری تک مدی به نام LP_{01} خوانده میشود.

در شکل زیر چند نوع مد قطبی شده و مدهای واقعی بوجود آورنده آنها با نحوه توزیع نور در محدوده میدان مد تارهای نوری آورده شده است .

مد های قطبی شده خطی	مد های واقعی بوجود آورنده	توزیع شدت نور	توضیحات
LP_{01}	HE_{11}		مد اصلی
LP_{11}	TE_{01}		
	TM_{01}		
	HE_{21}		
LP_{21}	EH_{11}		
	HE_{31}		

طول موج قطع : (Cut off Wavelength)

طول موج قطع ، طول موجی است که پایین تر از آن ، بیشر از یک مد (یعنی مد اصلی) از داخل تار نوری عبور می کند .

طول موج قطع برای مد LP01 از رابطه زیر بدست می آید:

$$\lambda_C = (2\pi a / 2.4048) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

که در آن :

2a = قطر هسته تار نوری

n_1 = ضریب شکست هسته

n_2 = ضریب شکست پوشش

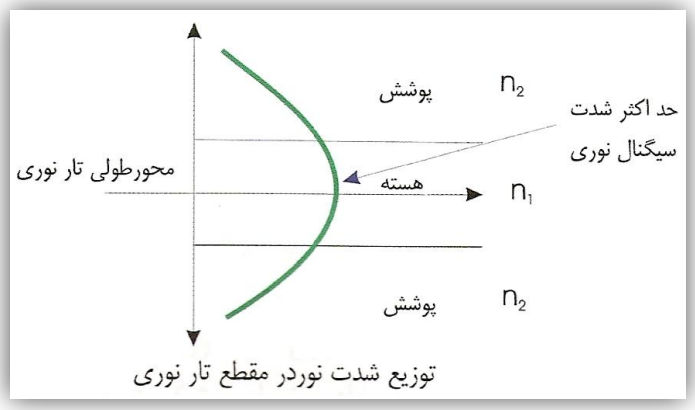
می باشد .

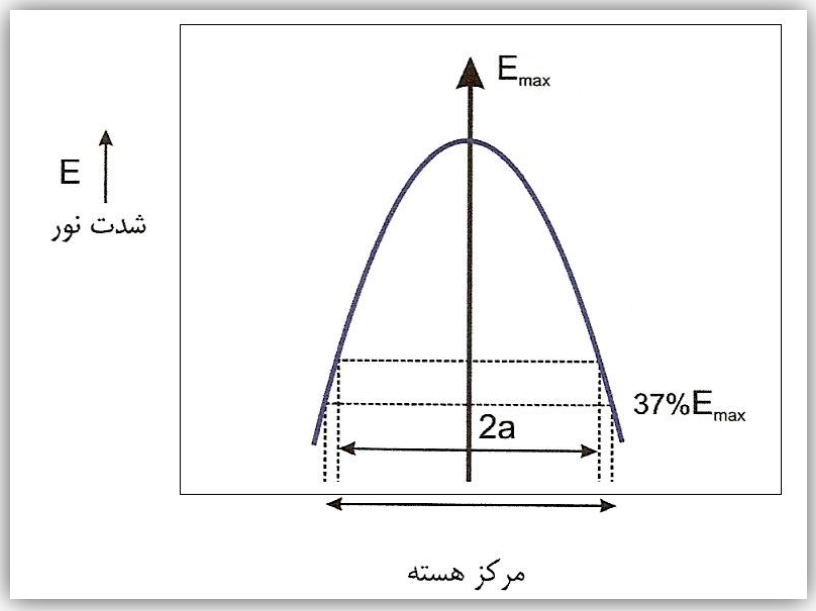
نسبت توان در طول موج قطع به توان نوری در مد اصلی را می توان به صورت رابطه زیر بیان کرد :

0.1 dB = توان نوری در مد اصلی / توان نوری در طول موج قطع

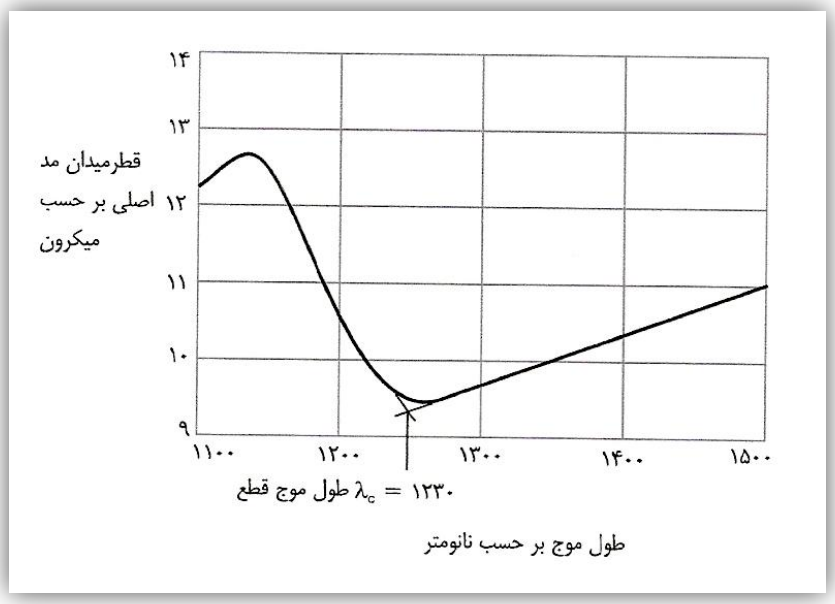
قطر میدان مد (PMD) :

قطر میدان مد اصل در تار های نوری تک مدی ، یکی از مشخصه های اصلی تار های نوری بوده که برای ارزیابی حجم نور ورودی به تار ، میزان خمش پذیری و نیز افت نقطه جوش نقش مهمی دارد ، این پارامتر را با $2W_0$ نشان می دهد . قطر میدان مد (MFD) مقطعی از تار نوری است که قدرت نور در دورترین نقطه آن به 37% حداکثر خود برسد .





و همینطور شکل زیر نمودار تغییرات قطر میذان مد نسبت به طول موج را نشان می دهد :



سطح مقطع موثر (Effective Area) :

سطح مقطع موثر (A_{eff}) ، مقدار سطحی از تار نوری است که نور را به داخل تار هدایت کرده و در آن مقطع منتشر می سازد . قطر وابسته به سطح مقطع موثر رابطه ای با قطر میدان مد اصلی دارد ولی به هر حال با آن برابر نیست .

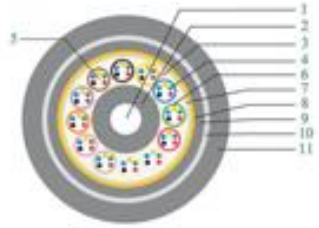
انواع کابل های نوری :

۱ -

کابل نوری ژله فیلد کانالی
(OCFC)

Optical Conduit Fiber Cable

این نوع کابل عموما درشبکه های درون شهری و بین مراکز مخابراتی استفاده می شود واطلاعات عمومی این نوع کابل درجدول زیر ارائه شده است. بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.



1. عنصر مقاوم مرکزی
2. روکش (در صورت لزوم)
3. ژله
4. تارنوری
5. ژله سرد
6. لوز تیوب
7. نوار پلی استر
8. عنصر مقاوم میانی (انتخابی)
9. روکش اولیه
10. نوار AL
11. روکش ثانویه

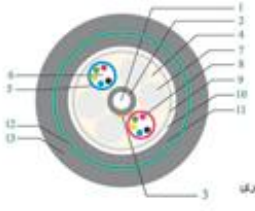
پارامتر		N2x6	N4x6	N8x6	N12x6
تعدادتیوب		۲	٤	۸	۱۲
تعداد فیلر		٤	۲	۰	۰
تعداد تارنوری		۱۲	۲٤	٤۸	۷۲
قطر عنصر مقاوم (mm)		۲/۵	۲/۵	۳	٤
نیروی کشش مجاز (N)	بدون عنصر کشش میانی	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	٤۰۰۰
	با عنصر کشش میانی	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۵۲۰۰	۵۲۰۰
قطر نهایی (mm)		۱۵	۱۵	۱۷	۲۰
وزن (kg/km)		۱۷۵	۱۸۰	۲۳۰	۳۳۰

۲ -

کابل نوری خشک خاکی
(OBUC)

Optical Buried Unfilled Cable

این نوع کابل دارای کاربرد ساختار مشابه (OBFC) میباشد با این تفاوت که به‌جای ژله از نخ و نوار جاذب رطوبت استفاده می شود.
این کابل دارای یک محافظ نوار استیل دندانه اره‌ای با روکش پلیمری (کروگیت) میباشد.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.



1. عنصر مقاوم مرکزی
2. روکش (در صورت لزوم)
3. نخ جاذب رطوبت
4. ژله
5. لوز تیوب
6. ژله سرد
7. پرکننده (فیلر)
8. تارنوری
9. نوار جاذب رطوبت
10. عنصر مقاوم میانی (انتخابی)
11. روکش اولیه
12. نوار استیل دندانه اره‌ای با روکش پلیمری
13. روکش ثانویه

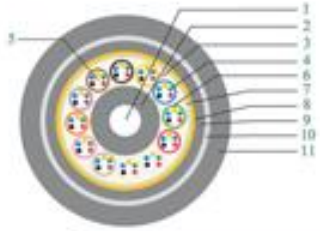
پارامتر		N1x4	N2x4	N2x6	N4x6	N8x6	N12x6
تعدادتیوب		۱	۲	۲	٤	۸	۱۲
تعداد فیلر		۵	٤	٤	۲	۰	۰
تعداد تارنوری		٤	۸	۱۲	۲٤	٤۸	۷۲
قطر عنصر مقاوم (mm)		۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۳	٤
نیروی کشش مجاز (N)	بدون عنصر کشش میانی	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
	با عنصر کشش میانی	٤۰۰۰	٤۰۰۰	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰
قطر نهایی (mm)		۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۸	۲۱

- ۳

کابل نوری ژله فیلد کانالی (OCFC)

Optical Conduit Fiber Cable

این نوع کابل عموما درشبکه های درون شهری و بین مراکزمخابراتی استفاده می شود واطلاعات عمومی این نوع کابل درجدول زیر ارائه شده است. بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.



1. عنصر مقاوم مرکزی
2. روکش (در صورت لزوم)
3. ژله
4. تارنوری
5. ژله سرد
6. لوز تیوب
7. نوار پلی استر
8. عنصر مقاوم میانی (انتخابی)
9. روکش اولیه
10. نوار AL
11. روکش ثانویه

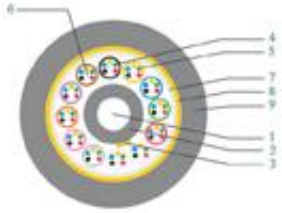
پارامتر		N2x6	N4x6	N8x6	N12x6
تعداد تیوب		۲	٤	۸	۱۲
تعداد فیلر		٤	۲	۰	۰
تعداد تارنوری		۱۲	۲٤	٤۸	۷۲
قطر عنصر مقاوم (mm)		۲/۵	۲/۵	۳	٤
نیروی کشش مجاز (N)	بدون عنصر کشش میانی	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰	٤۰۰۰
	با عنصر کشش میانی	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۵۲۰۰	۵۲۰۰
قطر نهایی (mm)		۱۵	۱۵	۱۷	۲۰
وزن (kg/km)		۱۷۵	۱۸۰	۲۳۰	۳۳۰

- ۴

کابل نوری خشک کانالی (OCUC)

Optical Conduit Unfilled Cable-Dry/Single Jacket

این نوع کابل دارای ساختار متفاوت و بدون ژله یا خشک میباشد. برای حفاظت کابل در مقابل نفوذ رطوبت از نوار جاذب رطوبت استفاده میشود.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.



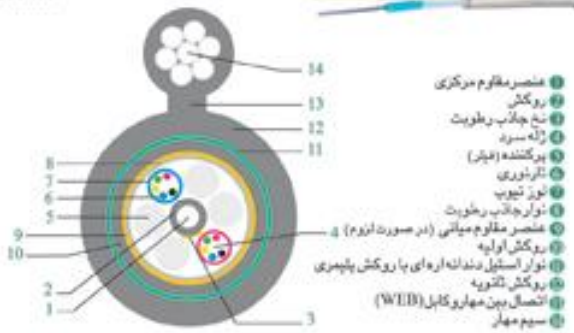
1. عنصر مقاوم مرکزی
2. روکش (در صورت لزوم)
3. نخ جاذب رطوبت
4. تارنوری
5. لوز تیوب
6. ژله سرد
7. نوار جاذب رطوبت
8. عنصر مقاوم میانی (انتخابی)
9. روکش

پارامتر		N2x6	N4x6	N8x6	N12x6	N12x12	N24x12
تعداد تیوب		۲	٤	۸	۱۲	۱۲	۲٤
تعداد فیلر		٤	۲	۰	۰	۰	۰
تعداد تارنوری		۱۲	۲٤	٤۸	۷۲	۱٤٤	۲۸۸
قطر عنصر مقاوم (mm)		۲/۵	۲/۵	۲/۵	۳	٤	٤
نیروی کشش مجاز (N)	بدون عنصر کشش میانی	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰
	با عنصر کشش میانی	٤۰۰۰	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۵۰۰۰	۳۲۰۰	۳۵۰۰
قطر نهایی (mm)		۱۲	۱۲	۱٤	۱۷	۱۹	۲۱/۵
وزن (kg/km)		۱۰۰	۱۰۵	۱٤۰	۲۱۵	۲۵۰	۲۹۵

- ۵

کابل نوری مهاردارهوایی با زره
(OSSC-Armord)

Optical Selfsupporting Aerial Cable
Double Jacket



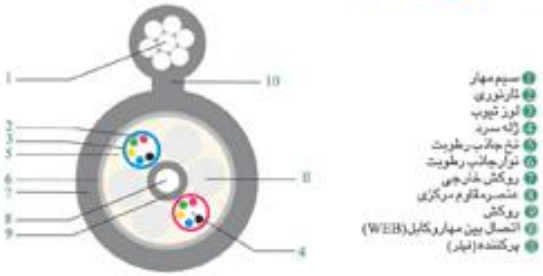
برای حفاظت ازکابل نوری مهاردار هوایی در مناطقی که احتمال تیراندازی توسط شکارچیان وجود داشته باشد، در ساختار کابل از نوار فولادی روکش دار بصورت دندان اره ای استفاده می‌شود.
این کابل دارای یک محافظ نوار استیل دندانه اره‌ای با روکش پلیمری (کروگیت) میباشد.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

پارامتر	N1x4	N2x4	N1x6	N2x6
تعدادتیوب	۱	۲	۱	۲
تعداد فیلر	۵	٤	۵	٤
تعداد تارنوری	٤	۸	۶	۱۲
قطر عنصر مقاوم (mm)	۲/۵			
نیروی کشش مجاز (N)	۱۰۰۰۰			
قطر نهایی (mm)	۱۶			
وزن (kg/km)	۳٤۰			

- ۶

کابل نوری مهاردارهوایی خشک
(OSSC-Dry/SJ)

Optical Self Supporting Aerial Cable
Dry/Single Jacket



برای حفاظت ازکابل نوری مهاردار هوایی در مناطقی که احتمال نفوذآب درساختمان کابل وجود داشته باشد، می توان درساختار کابل ازنخ و نوارجلاب رطوبت استفاده کرد.
این نوع کابل بدون ژله و نسبت به کابلهای ژله فیلد سبک تر میباشد.
براساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

پارامتر	N1x4	N2x4	N1x6	N2x6
تعدادتیوب	۱	۲	۱	۲
تعداد فیلر	۵	٤	۵	٤
تعداد تارنوری	٤	۸	۶	۱۲
قطر عنصر مقاوم (mm)	۲/۵			
نیروی کشش مجاز (N)	۱۰۰۰۰			
قطر نهایی (mm)	۱۱			
وزن (kg/km)	۱٤۰			

- ۷

کابل نوری مهاردار هوایی (OSSC)

Optical Selfsupporting Aerial Cable

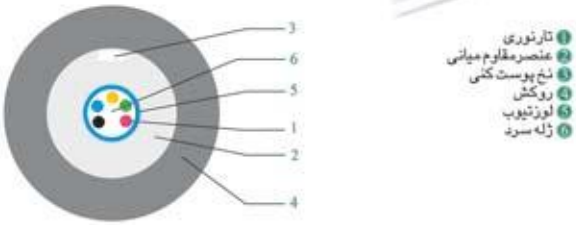
این نوع کابل درمناطق روستایی ومخابرات (TX) مورداستفاده قرارمیگیرد.
سیم مهار بکار رفته شامل ۷ رشته فولاد گالوانیزه می باشد که به هم تابیده شده و بصورت موازی با هسته کابل قرار میگیرد و بنابراین سطح مقطع این کابل به شکل 8 می باشد.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

پارامتر	N1x4	N2x4	N4x4	N1x6	N2x6	N4x6
تعدادتیوب	۱	۲	٤	۱	۲	٤
تعداد فیلر	۵	٤	۲	۵	٤	۲
تعداد تارنوری	٤	۸	۱۶	۶	۱۲	۲٤
قطر عنصر مقاوم (mm)	۲/۵					
نیروی کشش مجاز (N)	۷۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰					
قطر نهایی (mm)	۱۰/۵ (بهنای کابل)					
وزن (kg/km)	۲۰۰					

- ۸

کابل نوری با تیوپ مرکزی (OFC-Central Tube)

Optical Fiber Cable -Central Tube



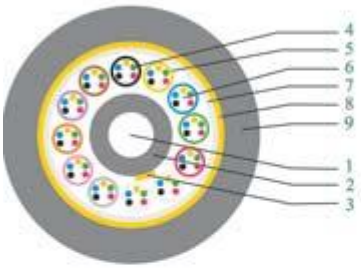
در این نوع کابل فیبرها درون یک تیوب در مرکز کابل قرار می گیرند.
در اطراف تیوپ مرکزی بر اساس نیاز از عنصر مقاوم میانی استفاده شده و سپس یک لایه روکش برروی آن قرار می گیرد. بر حسب نوع کاربرد جنس روکش تغییر می کند.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

پارامتر	N1x2-M1x12
تعدادتیوب	۱
تعداد تارنوری	۲-۱۲
نیروی کشش میانی (N)	۱۶۰۰-۲۵۰۰
قطر نهایی (mm)	۱۰/۵-۱۵
وزن (kg/km)	۱۳۳-۲٤۳

- ۹

کابـل (ADSS)

All Dielectric Self Support Cable



این نوع کابل دارای ساختار متفاوت و بدون ژله یا خشک میباشد. برای حفاظت کابل در مقابل نفوذ رطوبت از نوار جاذب رطوبت استفاده میشود. این کابل در مجاورت کابلهای فشار قوی استفاده میگردند و دارای روکش مقاوم ضد ترک (Anti Track) می باشند نیروی کشش کابل زیاد می باشد که البته متناسب با شرایط جوی و نحوه کاربـرد، نیروی کشـش متناسباً تنظیم و طراحی می گردد.

پارامـتر		N2x6	N4x6	N8x6	N12x6	N12x12	N24x12
تعدادتیوب		۲	٤	۸	۱۲	۱۲	۲٤
تعداد فیلر		٤	۲	۰	۰	۰	۰
تعداد تارنوری		۱۲	۲٤	٤۸	۷۲	۱٤٤	۲۸۸
قطر عنصر مقاوم (mm)		۲/۵	۲/۵	۲/۵	۳	٤	٤
نیروی کشش مجاز (N)	بدون عنصر کشش میانی	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰
	با عنصر کشش میانی	٤۰۰۰	٤۰۰۰	٤۰۰۰	۵۰۰۰	۳۲۰۰	۳۵۰۰
قطر نهایی (mm)		۱۲	۱۲	۱٤	۱۷	۱۹	۲۱/۵
وزن (kg/km)		۱۰۰	۱۰۵	۱٤۰	۲۱۵	۲۵۰	۲۹۵

بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

- ۱۰

INDOOR CABLE (Tight Buffer)

Indoor Cable

این نوع کابل دارای انعطاف پذیری بالامی باشد فیبـرهای نـوری بصورت روکـش Tight می باشد میزان تحمل کشش بر اساس نیاز می‌تواندمحاسبه و تولید شود.
بر اساس نیاز متقاضی، سایر ساختارهای کابل نیز قابل تولید میباشد.

فصل سوم

عوامل تضعیف در فیبر نوری

عوامل تضعیف در فیبر نوری :

دو عامل مهم در ارزیابی سیستم های مخابراتی عبارتند از :

۱. تضعیف یا تلفات سیگنال

۲. سیگنال و پهنای باند

این دو عامل که به جنس فیبر و روش ساخت آن وابسته است ، تابع طول موج نور نیز میباشند .

۱. تضعیف (Attenuation)

تضعیف در تارهای نوری یکی از عوامل مهم در انتقال اطلاعات است که در میزان فاصله تکرار کننده ها اثر می گذارد. این پارامتر در تعیین حداکثر فاصله بین گیرنده و فرستنده نقش عمده ای را ایفا می کند.

مقدار تضعیف تارهای نوری در مقایسه با کابل مسی بسیار کم بوده و در نتیجه فواصل تکرار کننده ها بسیار زیادتر شده است و عامل مهمی در مقرون به صرفه بودن استفاده از سیستم های نوری است .

در حال حاضر تضعیف در طول موج 1550 نانومتر به 0/2 دسی بل بر کیلومتر رسیده است. با این مقدار، چنانچه تضعیف مربوط به محدوده هر تکرار کننده را 40 دسی بل فرض کنیم، مقدار فاصله مجاز برای کابل کشی با این نوع کابل 200 کیلومتر خواهد شد.

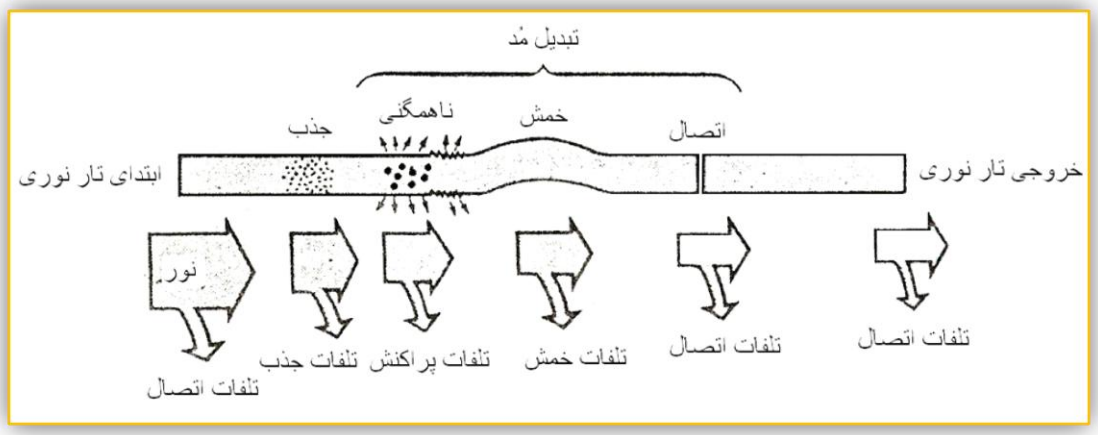
عوامل اصلی پدیده تضعیف یا تلفات فیبرنوری عبارتند از :

1- تلفات جذبی (Absorption Losses)

2- تلفات پراکندگی (Scattering Loss)

3- تلفات خمش یا تشعشع (Bend or Radiation Loss)

4- تلفات اتصال (Joint Loss)



واحد اندازه گیری :

افت نوری برابر است با مقدار کاهش توان نور در یک محیط موجبر (OWG) .

واحد اندازه گیری افت ، دسیبل (Decibels) می باشد که برای هر دو حالت افت یا تقویت کاربرد داشته و از رابطه زیر بدست می آید :

$$\text{افت (dB)} = 10 \log_{10} (\text{توان خروجی} / \text{توان ورودی})$$

به منظور آشنایی بیشتر به مثال های زیر توجه کنید :

- مقدار 10dB افت اندازه گیری شده در انتهای یک موجبر به معنی این است که سیگنال خروجی برابر 10% سیگنال ورودی قدرت داشته و یا سیگنال ورودی 90% توان خود را از دست داده است .
- مقدار 3dB افت اندازه گیری شده در انتهای یک موجبر به معنی این است که سیگنال خروجی برابر 50% سیگنال ورودی قدرت داشته و یا سیگنال ورودی 50% توان خود را از دست داده است .
- مقدار 0.0dB افت اندازه گیری شده در انتهای یک موجبر به معنی این است که توان سیگنال خروجی برابر با توان سیگنال ورودی بوده و خط بدون افت است .
- ضمناً در تارهای نوری با افت 0.2dB/km در طول موج 1550 نانومتر ، توان سیگنال در هر کیلومتر به میزان 4.5% کاهش می یابد .

یکی دیگر از واحدهای سنجش توان به نام dBm می باشد که سطح سیگنال را نسبت به توان مبنای 1mW اندازه گیری کرده و مقدار آن از فرمول زیر محاسبه می گردد :

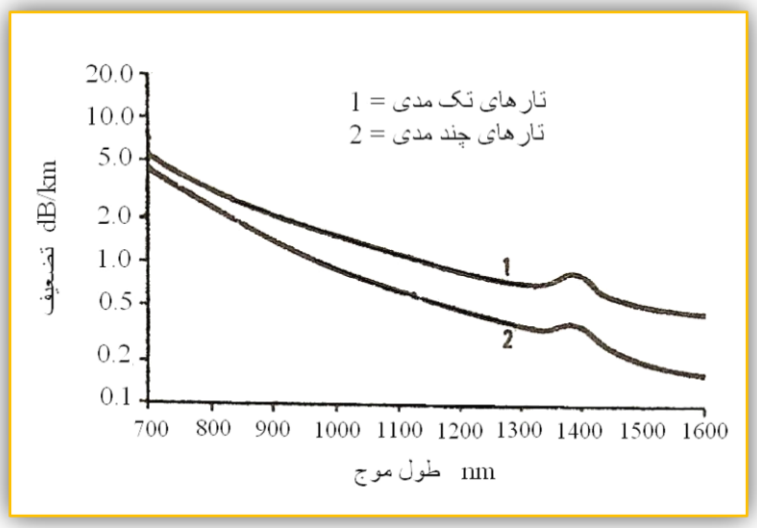
$$\text{dBm} = 10 \log_{10} (\text{مقدار توان سیگنال} / 1\text{mW})$$

به منظور آشنایی بیشتر با فرمول بالا چند نمونه مثال در زیر آورده شده است :

30 dBm = 1w و 0dBm = 1mw و

-30 dBm = 1µw و -60 dBm = 1 nw و -90 dBm = 1 pw

منحنی طیفی ضریب تضعیف برای فیبر های تک مدی و چند مدی در شکل زیر نمایش داده شده است .



1- تلفات جذبی (Absorption Losses)

پدیده جذب باعث تبدیل مقداری از انرژی نورانی به حرارتی می گردد ، این پدیده در اثر مواد تشکیل دهنده فیبر بوجود می آید و موادی که در ساخت فیبر بکار می رود باعث جذب یا از بین بردن مقداری از انرژی ورودی به فیبر می شود . پدیده جذب را می توان به دو دسته تقسیم نمود :

۱) جذب ذاتی (داخلی)
۲) جذب عارضی (خارجی)

۱) جذب ذاتی (Intrinsic Absorption)

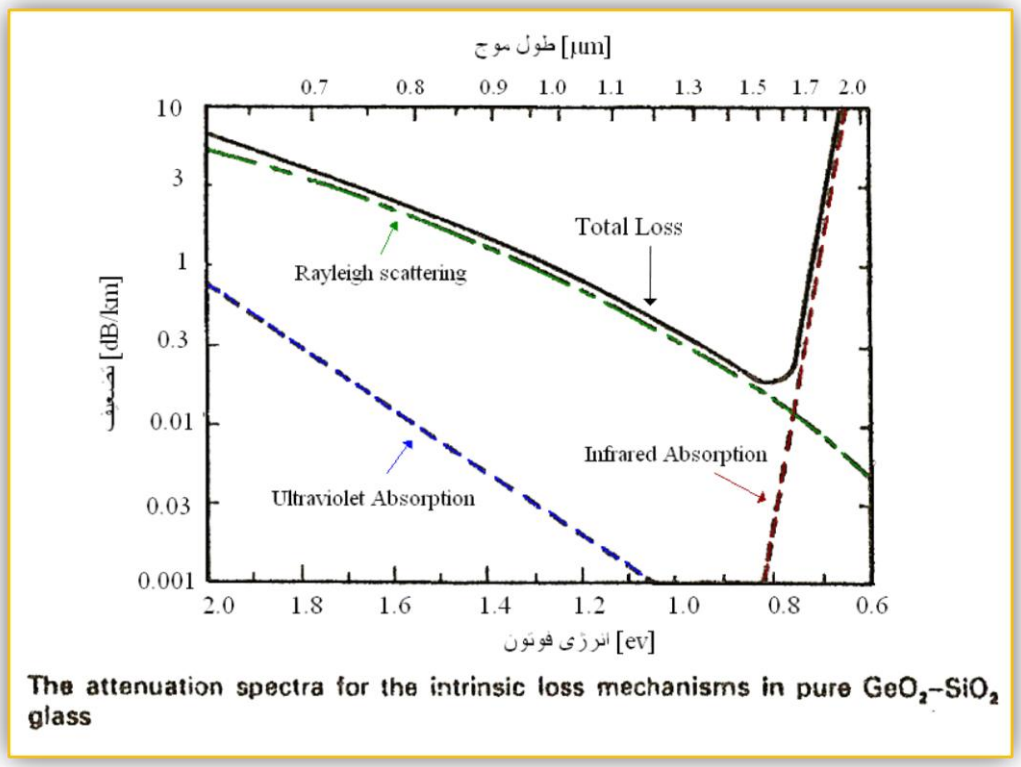
این جذب به جنس شیشه فیبر بستگی دارد و با هیچ نوع ترکیبی از مواد مختلف نمی توان آنرا از بین برد . شیشه خالص از جنس Geo_2 و Sio_2 ، در طول موج های مختلف دارای جذب متفاوتی است .

یکی در اثر ارتعاش و انتقال الکترونهای اتم شیشه از مداری به مداری با انرژی بیشتر است که در این حالت انرژی کمی مورد نیاز است ، این جذب در منطقه ماورابنفش یعنی در طول موج های کمتر از 700 نانومتر صورت می گیرد (جذب UV) .

یکی دیگر از عوامل ، اثر ارتعاش مُلکول شیشه در مقابل فوتون عبوری می باشد و زمانی اتفاق می افتد که یک فوتون با یک الکترون در باند ظرفیت برخورد کرده و آنرا تحریک می کند و به سطح انرژی بالاتر می برد که اثر آن در منطقه مادون قرمز و بعد از آن یعنی در طول موجهای بیشتر از 1700 نانومتر آشکار می گردد (جذب IR) .

بنابراین سیستمهای مخابراتی فیبر شیشه ای الزاماً باید در طول موجهای 1700 الی 700 نانومتر محدود شوند . از عوامل دیگر افت ذاتی پراکندگی رایلی (Rayleigh scattering) می باشد (اگر تلفات رایلی در مقیاس طول موج انگسترم باشد .) که مربوط به توزیع ماده داخل جامدات بی شکل می باشد که درآنها ضریب اِنکسار متفاوت می باشد در مقدار این افت همانطور که بعداً توضیح خواهیم داد با عکس توان چهارم طول موج متناسب می باشد بنابراین طول موجهای بیشتر ، دارای تلفات پراکندگی کمتری هستند .

در شکل زیر منحنی تغییرات تضعیف اکسید سیلیکا (sio_2) و اکسید ژرمانیوم (Geo_2) نسبت به انرژی فوتون را برای جذب ذاتی می بینید .



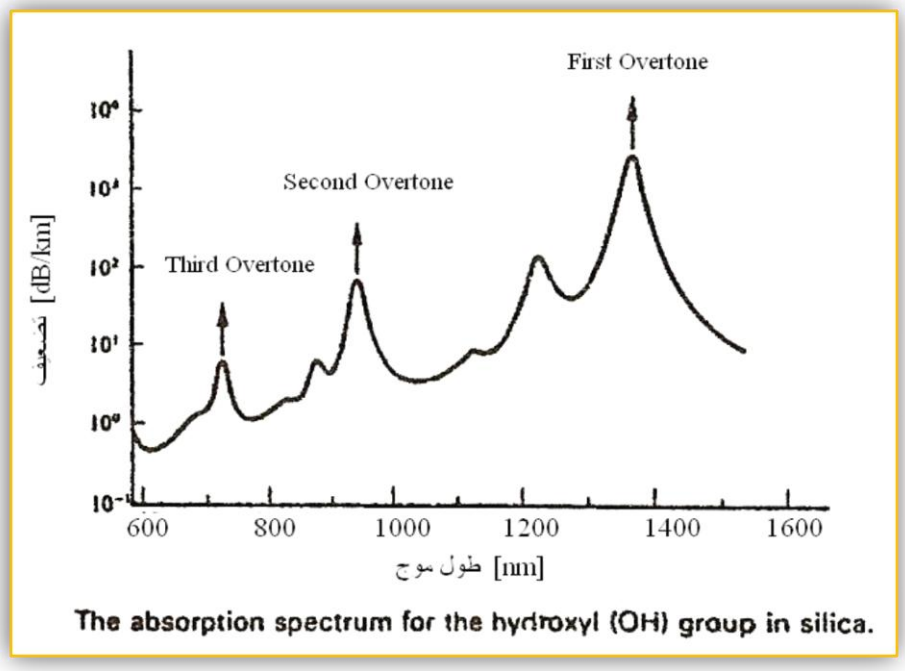
The attenuation spectra for the intrinsic loss mechanisms in pure GeO_2–SiO_2 glass

۲) جذب عارضی (Extrinsic Absorption)

این جذب که توسط اتمهای مواد ناخالصی موجود در مواد شیشه صورت می گیرد . در ساخت فیبر به روش ذوب مستقیم مقدار خلوص به 100 % نمی رسد و اتمهای فلزی هر چند به مقدار کم (10^{-9}) باقی می ماند و همین اتمها جذب ایجاد می کند که از همه مهمتر

فلزات Cu (مس) ، Fe (آهن) و Cr (کُرم) بیشترین جذب را نشان می دهند . ولی ساخت فیبر به روش رسوب بخار ، این جذب را یک تا دو برابر کمتر خواهد کرد و میتوان تقریباً از جذب ناخالصی مواد صرف نظر کرد و تنها جذب موجود مربوط به یون بخار آب (OH^-) می باشد وجود ناخالصی OH (آب) در پیش سازه (پریفورم) فیبر به این علت است که از ترکیب اکسیژن با $Si\ CL_4$ و $Ge\ CL_4$ و $Po\ CL_3$ در فعل و انفعالات شیمیایی استفاده می شود . بطور کلی در محیط رطوبت ، تلفات OH بیشتر نمایانگر می گردد .

وجود آب در شیشه باعث افزایش هارمونیک نوسانات (مربوط به عامل OH) می شود که در اثر جذب در طول موج مورد نظر حاصل می گردد . فیبرهای اولیه که میزان OH آنها زیاد بود ، تلفات زیادی از خود نشان می دادند که ماکزیمم آنها در طول موجهای 1.38 و 0.95 و 0.72 میکرومتر قرار داشت که اینها همان هارمونیکهای اول و دوم و سوم جذب هستند ، در شکل زیر منحنی تضعیف در طول موجهای مختلف برای یک فیبر ساخته شده و با روشهای اولیه که مقدار ناخالصی آب آن زیاد است ، نشان داده شده است .

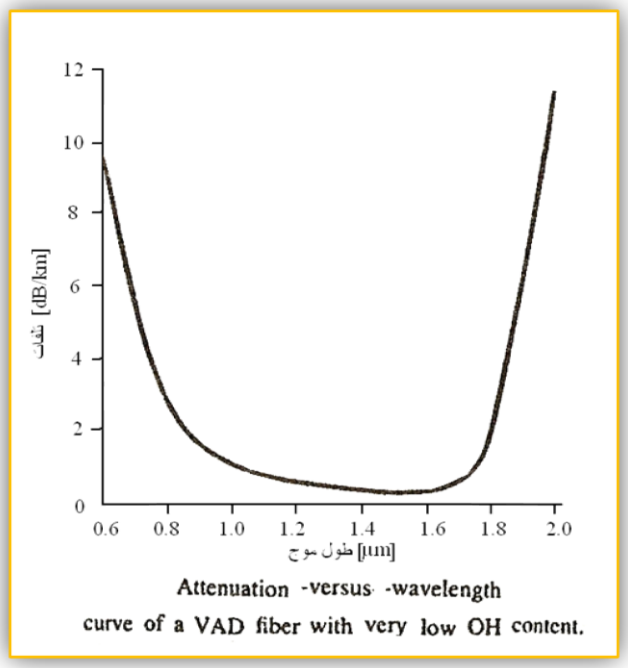


The absorption spectrum for the hydroxyl (OH) group in silica.

مقدار افت عارضی را در صورت دقت در تکنیک ساخت می توان تا حدود زیادی کاهش داده و یا از بین برد . همانطور که گفتیم علت عمده تلفات جذبی ، وجود ناخالصی های فلزی و آب است برای کاهش مقدار تلفات تا حدود قابل قبول لازم است که میزان ناخالصیهای فلزات به کمتر از 1 ppb (یک ذره به ازای یک بیلیون ذره) و ناخالصی یون OH را به کمتر از 1 ppm (یک ذره به ازای یک میلیون ذره) برسد ، بنابراین لازم است که به جای پیروی از سنتهای

موسوم در صنعت شیشه سازی ، از فنون بکار گرفته شده در صنایع نیمه هادی که خلوص بسیار زیادی را امکان پذیر ساخته ، استفاده به عمل آید .

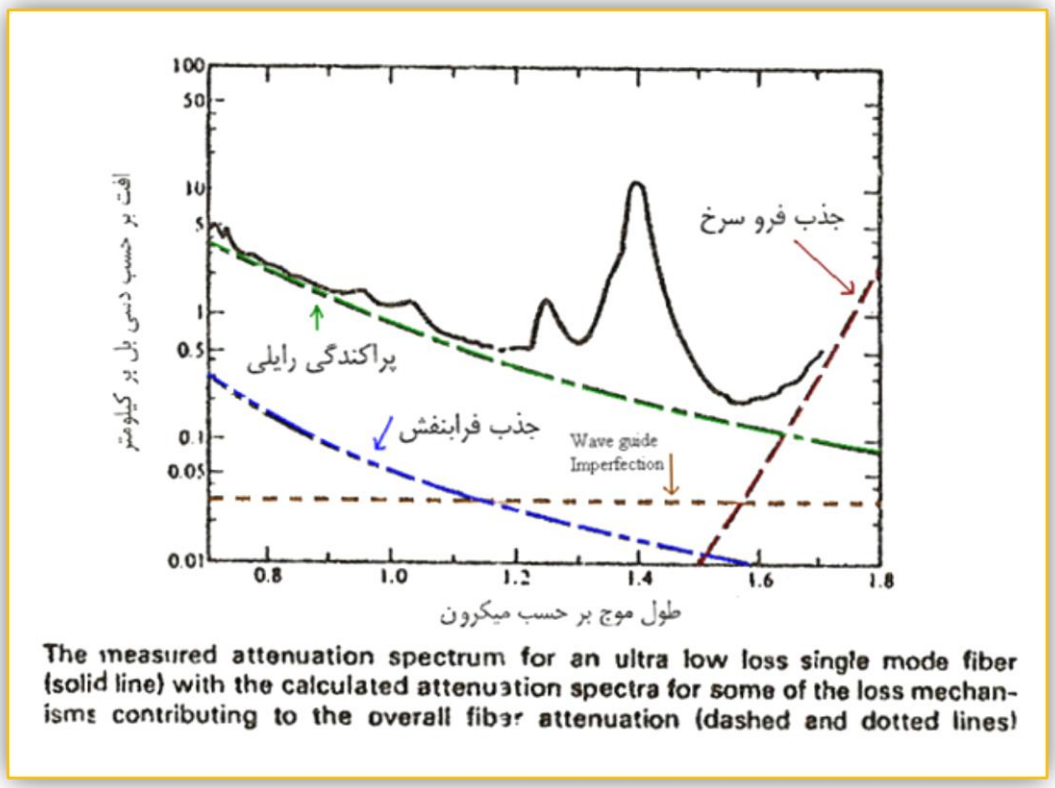
البته درجه حرارت لازم برای آنکه تعداد یون های OH به کمتر از 0.1 ppm برسد 1200°c است بعنوان مثال منحنی شکل زیر مربوط به فیبری است که به روش رسوب بخار ساخته شده و OH آن کمتراز 0.8 ppb میباشد .



Attenuation -versus- -wavelength curve of a VAD fiber with very low OH content.

تلفات جذبی را برای یک فیبر تک مدی در طول موج های مختلف در شکل پایین تصویر شده است که جذب یون OH به صورت تجربی رسم شده است نشان می دهد که در طول موج μm 1.55 کمترین تضعیف یعنی 0.2 dB/km می توان بدست آورد .

(Wave guide Imperfection) یعنی اختلالات ساختاری در ساخت موجبر نیز جز ء عوامل تضعیف بشمار می رود که بر خلاف بقیه تلفات به طول موج بستگی ندارد و هرچه فیبر ساخته شده دارای انحناء کمتر و تغییر قطر کمتری در طول خود باشد و به بیان دیگر مستقیم تر و دارای ساخت یکنواخت تری باشد ، تلفات و افت انرژی مربوط به اختلالات ساختاری در آن کمتر است .



The measured attenuation spectrum for an ultra low loss single mode fiber (solid line) with the calculated attenuation spectra for some of the loss mechanisms contributing to the overall fiber attenuation (dashed and dotted lines)

۲ - تلفات پراکندگی (Scattering Losses)

تلفات پراکندگی علاوه بر مواد ساخت فیبر به غیر یکنواختی ساختمان فیبر نیز بستگی دارد . این تلفات عمدتاً از عواملی نظیر تغییرات و نوسانات دانستیه (چگالی) مواد (density fluctuation) و تغییرات جزئی در حجم و محتوا و ترکیب مواد فیبر (content fluctuation) و ناهمگونی های ساختمانی فیبر نوری که در موقع ساخت آن بوجود می آید ناشی می شود . نوسانات در دانستیه خود معلول نوسانات حرارتی مربوط به اتمهای تشکیل دهنده شیشه است و زمانی رخ می دهد که فیبر در حال سرد شدن در مرحله ساخت باشد . عوامل ذکر شده بالا با عث تغییرات جزئی ضریب شکست در طول فیبر و پراکندگی نور منتشره می شود . بطور کلی دو نوع مکانیزم پراکندگی در فیبرهای نوری موجود است :

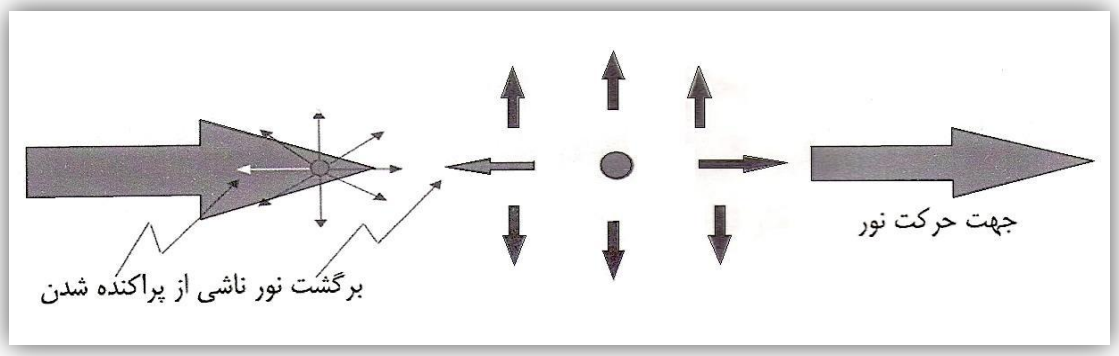
۱) پراکندگی رایلی (Rayleigh Scattering)

که حاصل از ناهمگونی یا عدم تجانس (In homogeneities) مواد دی الکتریک ضریب شکست هسته می باشد و این عدم تجانس غیر قابل اجتناب می باشد زیرا مولکولهای موجود در یک ماده با شکل غیر کریستالی (Amorphous) به صورت غیرمنظم توزیع شده اند بطورکلی برخورد نور به هر جسم ، ایجاد scattering می کند و اگر ابعاد آن جسم کوچکتر از طول موج نور باشد در آن صورت آن جسم خاص تولیدی پراکندگی رایلی می کند . تضعیف حاصل از پراکندگی رایلی متناسب با عکس توان چهارم طول موج ($1/\lambda^4$) می باشد . بنابراین این نوع تلفات با افزایش طول موج سریعاً کاهش پیدا می کند و این تلفات بستگی به تعداد مدها یا شعاع هسته ندارد که از رابطه زیر بدست می آید . تضعیف حاصل از پراکندگی رایلی در سیلیکای ناخالص شده در طول موج 900 نانومتر معمولاً برابر 0.9 dB/km و در 1300 نانومتر برابر0.3 dB/km و برای 1550 نانومتر 0.15 dB/km می باشد .

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 \left(\lambda_0/\lambda \right)^4$$

که در آن :

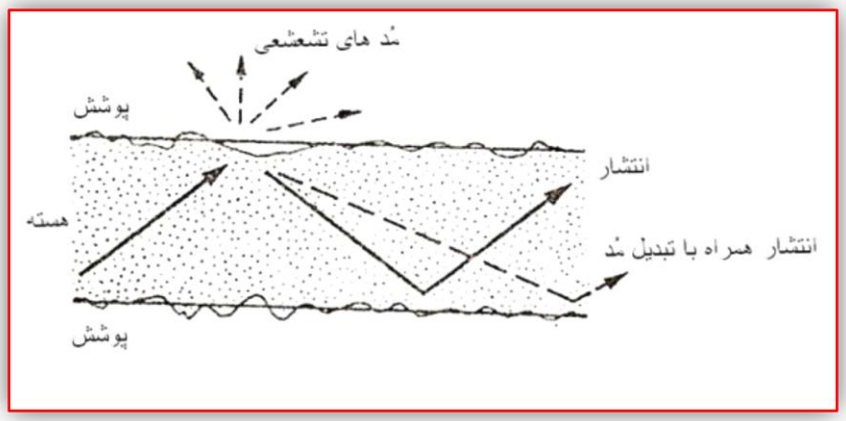
$\alpha_0 = 1.7$ dB/km و $\lambda_0 = 850$ nm است .



2) Mie Scattering

این تلفاتی است از نوع اسکاترینگ که در برخورد موج الکترومغناطیس با جسمی با ابعاد بزرگتر یا مساوی طول موج منبع نور پدید می آید و مربوط به اثرات ناهماهنگی و عدم یکنواختی و بی نظمی در سطح جداکننده هسته و غلاف است که معمولاً در مرحله تولید فیبر بوجود می آیند و باعث پراکنده شدن نور به خارج فیبر می گردد .

همانطور که در شکل روبرو می بینید ، اگر مرز میان هسته و غلاف ، خط مستقیم نباشد و ناهمواری وجود داشته باشد خط نوری که در داخل هسته در حال انتشار است در نقاط ناهموار انحراف پیدا می کند و تبدیل مُد اتفاق می افتد همچنین در مواردی که زاویه تابش از زاویه بحرانی کوچکتر می شود سبب تشعشع و ورود نور به داخل غلاف می شود .



در فیبر نوری جهت انتقال تا فواصل دور اگر کمی هم از این ناهمواریها وجود داشته باشد ، بعلت ایجاد پدیده های تلفات تشعشعی و تبدیل مُد ، تلفات افزایش می یابد و پهنای باند محدویت می یابد . این نوع تلفات بنام تلفات مرزی نیز گفته میشود . با روشهای امروزی ، و با درنظر گرفتن موارد زیر ،برای ساخت پیش سازه فیبر تا حدود زیادی میتوان ناهمواریها را به حداقل رساند .

- دقت در ساخت درست پریفورم فیبر
- دقت و کنترل در پوشش فیبر
- زیاد کردن هدایت فیبر بوسیله زیاد کردن Δ

۳ -تلفات خمش یا تشعشع (Bend or Radiation Loss)

عبور نور از یک خمش تند با شعاع بسیار کوچک موجب تلفات تشعشع می گردد .

خمش های موجود در تارهای نوری ممکن است در هنگام تولید ایجاد شده باشند و یا در هنگام نصب آنها به علت ایجاد شعاع خمش بیش از حد مجاز ، به وجود آیند .

خمیدگی در فیبرها به دودسته تقسیم می شوند :

۱) درشت خمها (Macro Bending)
۲) ریز خمها (Micro Bending)

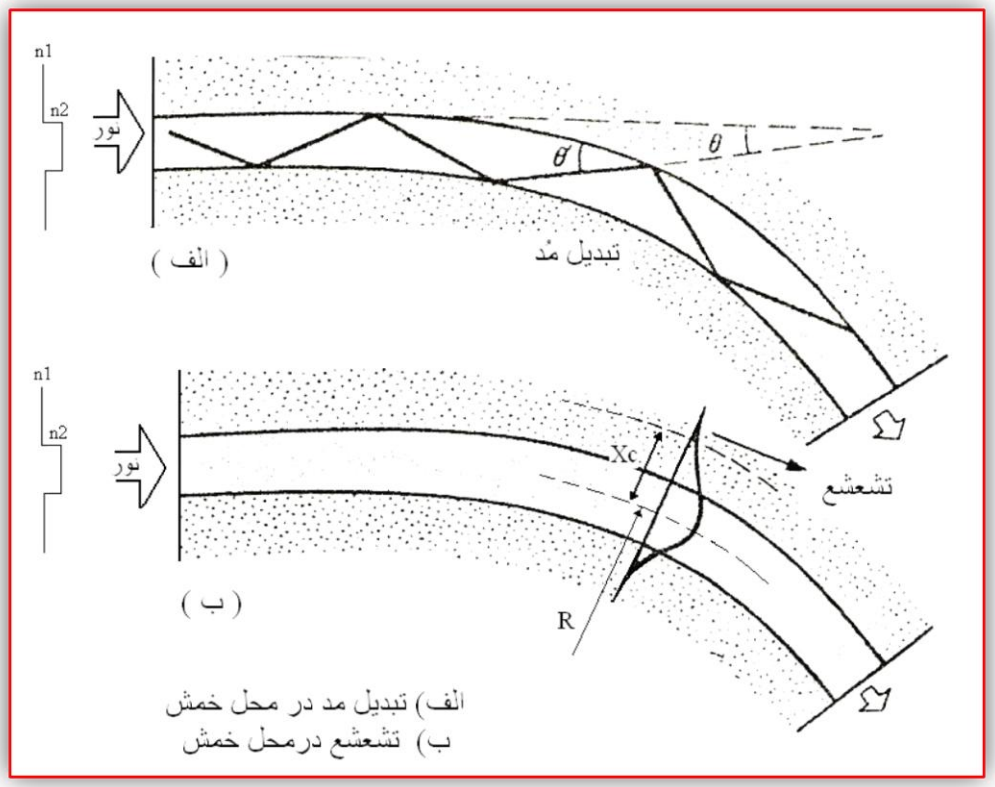
۱) درشت خمها (Macro Bending)

خمشهایی هستند که شعاع آنها در مقایسه با قطر فیبر بزرگ هستند ، مانند خمهایی که در کابل کشی در عبور از مسیرهای مختلف به وجود می آید و می توان جزء افت عارضی به

حساب آورد . تلفات تشعشعی در اثر درشت خمها با توجه به شرایط کنونی با شعاع های بزرگتر از 10 سانتیمتر ، بسیار ناچیز است ولی با کوچکتر شدن شعاع ، تلفات به طور نمایی زیاد می شود .

اگر شعاع خمش کوچکتر از شعاع بحرانی شود ، تلفات به طور ناگهانی و به مقدار زیاد افزایش پیدا می کند .

بیان تلفات خمش با بررسی توزیع میدان الکتریکی مُدها ممکن است . همانطور که در شکل می بینید وقتی که فیبر را خم می کنیم میدان جانبی در کناره بیرونی ، از محور خمش تمایل به حرکت سریعتر پیدا می کند تا از میدان هسته عقب نیافتد . آن بخش از میدان که فاصله اش از محور فیبر از فاصله بحرانی Xc بیشتر است باید سریعتر از سرعت نور حرکت کند تا بتواند خود را با میدان هسته تطبیق دهد واین غیر ممکن است در نتیجه این بخش از انرژی نور تلف شده و تشعشع می کند .



چون مدهای از درجه بالاتر کمتر از مدهای درجه پایین تر در هسته متمرکزند ، بنابراین بیشتر مدهای بالاتر تشعشع می کنند . در نتیجه تعداد مدهایی که توسط یک فیبر خم شده هدایت می شوند کمتر از فیبرهای مستقیم است .

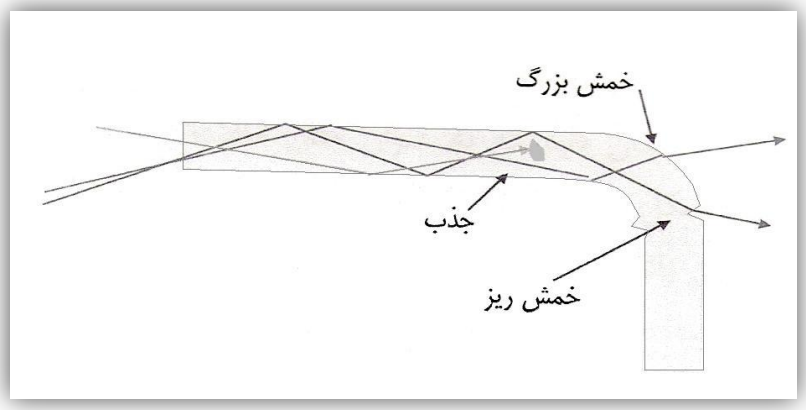
برای کم کردن شعاع بحرانی (R_c) میتوان :

- Δ را بزرگ انتخاب کرد
- λ را کوچک انتخاب کرد

۲) ریز خم ها (Micro Bending)

ریز خم ها ، خمشهای میکروسکوپی هستند که معمولاً در موقع قرار دادن تار در کابل حاصل می شود . این نوع تلفات تشعشعی ، در اثر ریزخمشهای موجود در تار نوری در مراحل تولید و در زمان پوشش و یا کابل نمودن آن بوجود می آید . یک تار واقعی به صورت کاملاً صاف نیست و دارای انحناء می باشد این نوع تلفات جزء افت ذاتی فیبر می باشد . ریزخمشها معمولاً در اثر خمش مکرر فیبر در موقع قرار گرفتن در داخل کابل و یا در اثر غیر یکنواختی روکش اولیه که موجب خمیدگی تار داخل آن می گردد ، بوجود می آیند . در ضمن با تغییرات زیاد درجه حرارت ، نمود آنها آشکارتر می شود .

یکی از روشهائی که برای حداقل کردن تلفات ریزخمشها در فیبر بکارگرفته می شود این است که یک روکش ضخیم و نرم که بتواند فشار نیروهای خارجی را در خود خنثی کرده و کمتر به فیبر منتقل کند ، روی فیبر کشیده می شود .

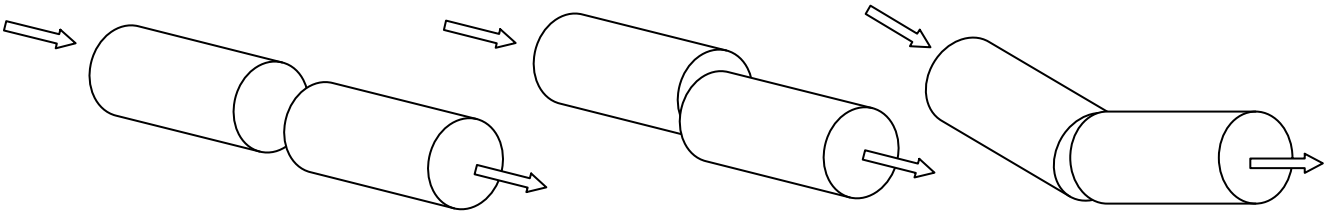


۴ -تلفات اتصال و مفصل (Joint and Splices Loss)

برای انتقال امواج نوری تا فواصل دور لازم است که فیبرهای نوری را به یکدیگر متصل کرد و یا اینکه در محل تکرار کننده ها آنها را به طول معینی بریده و به اجزای دیگری اتصال داد . در شکل پایین جابه جایی اتصالات که عملاً پیش می آید را نشان داده شده است . این جابجایی می تواند شامل :

- فاصله یا جابجایی طولی (Longitudinal Misalignment)
- در یک امتداد نبودن یا جابجائی عرضی (Lateral Misalignment)
- هم محور نبودن یا جابجائی زاویه ای (Angular Misalignment)

باشد ، دراین صورت همه نورخارج شده از تار اولی وارد تار دومی نمی شود و باعث تلفات اتصال میشود .



تلفاتی که در اثر اتصال فیبرها ایجاد می شود تابع دو فاکتور است .

- ✓ فاکتور اول ، تفاوت ساختاری و ذاتی بین دو فیبر (Intrinsic Factors) عبارتند از :

a) اختلاف قطرهای هسته یا پوشش دو فیبر

b) اختلاف روزنه عددی و Δ بین دو فیبر

c) اختلاف ضریب شکست پروفایل دو فیبر

d) نقص و عیب دو فیبر (اگر هسته به صورت بیضوی و یا .....) باشد .

- ✓ فاکتور دوم ، عوامل خارجی (Extrinsically factors) که ناشی از تکنیک کار مفصل بندی است و از بخش های a و b و c به ترتیب زیر منشاء میگیرند .

a) تکنیک برش فیبرها ؛ چنانچه برش انتهای دو فیبر قبل از مفصل بندی کج باشد خود به خود تلفات مفصلی بوجود خواهد آمد . زاویه کجی یا زاویه برش نباید بیشتر از 2° باشد .

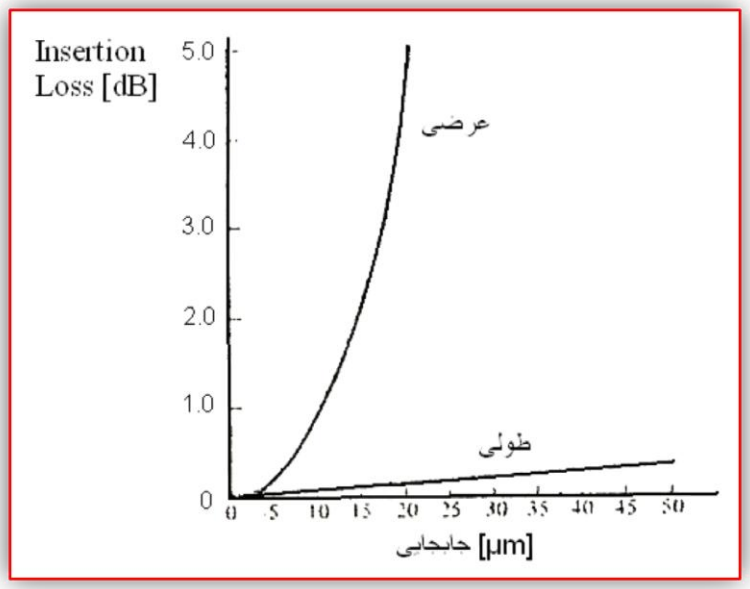
b) تکنیک تعادل و تساوی قطر هسته ها و هم ترازی آنها در روش انجام دستی . (با استفاده از دستگاههای اتوماتیک که در این مورد ساخته شده ، هیچگونه عدم تطابق محوری در فیبرهایی که باید مفصل شوند و به وجود نمی آید . امّا چنانچه این عمل بطوردستی صورت گیرد ایجاد هم محوری بین دو هسته بستگی به مهارت مفصل بند دارد .)

c) کنترل شرایط انجام کار و ترتیب آنها (وقتی شرایط انجام کار و پیاده کردن مراحل مختلف مفصل بندی مختل شود و از ترتیب خارج گردد تلفات مفصلی افزایش می یابد) همانطور که گفتیم یکی از تلفات اتصال جابجائی محورهای دو فیبر است ، اگر مقدار جابجایی محورها کمتر از 10% شعاع هسته باشد ، تلفات اتصال چندان قابل ملاحظه نخواهد بود . از این نظر فیبرهای دارای شعاع هسته بزرگ از نظر تلفات اتصال بهتر هستند .

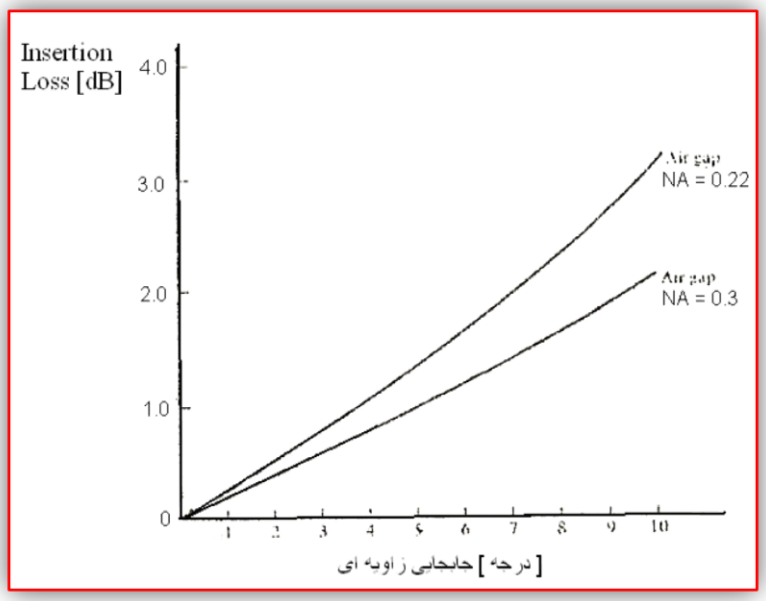
در مورد فیبر تک مُدی که شعاع هسته آن بسیار کوچک است ، مقدار تلفات اتصال بیشتر است زیرا مراکز هسته ها ، حتی اگر فیبرها دقیقاً تنظیم شوند برهم منطبق نخواهند بود .

در شکل زیر منحنی تضعیف برای دو نوع جابجایی طولی و جابه جائی عرضی را برای یک فیبر ضریب تدریجی با قطر هسته 50µm نشان می دهد . همانطور که مشاهده می کنید

افت جابجایی عرضی بیشتر از افت جابجائی طولی در یک فاصله مشخص است ، مثلاً در فاصله 10 km ، افت عرضی حدود 1dB و افت طولی حدود 0.1dB می باشد .



در شکل پایین تضعیف جابه جائی زاویه ای را برای دو نوع فیبر چند مُدی ضریب پله ای با روزنه عددی 0.22 و 0.3 نشان می دهد . اگر تضعیف حدود 1dB باشد مقدار جابه جائی زاویه ای بین 4° برای NA=0.22 و 5° برای NA= 0.3 بدست می آید یعنی هر چقدر NA بیشتر باشد مقدار تضعیف جابه جائی زاویه ای کمتر می شود .



تضعیف اتصال دو فیبر بر حسب قانون فرسنل :

(Joint Loss due to Fresnel Reflection)

همانطور که گفتیم در اتصال دو فیبر بهم دیگر ، حتی اگر انتهای دو فیبر که بهم وصل می شوند کاملاً صاف و بطور عمودی به محور فیبر وصل شوند و دو محور فیبر کاملاً در یک خط راست باشند باز هم امکان دارد مقداری از انرژی نور در موقع عبور از سطح جدایی دو محیط منعکس گردد و باعث تضعیف شود .

این پدیده قانون فرسنل را بیان می کند و ضریب انعکاس فرسنل (r) از فرمول زیر محاسبه می شود :

$Loss_{Fres}$ = -10 log (1- r) $r = \left(\frac{n - n}{n + n}\right)^2$

که :

r = جزءی از نور انعکاس یافته در یکطرف حد فاصل بین دو فیبر اتصالی

n_1 = ضریب شکست هسته فیبر

n = ضریب شکست محیط بین دو فیبر اتصالی

$Loss_{Fres}$ = افت اتصال بر حسب دسیبل (در یکطرف حد فاصل بین دو فیبر اتصالی)

بنابراین برای بدست آوردن افت اتصال ، باید افت هر طرف را بدست آورده و با هم جمع کنیم.

2 . پهنای باند (htdiW dnaB)

مهندسین و متخصصان شبکه های مخابراتی همواره می دانستند که با ازدیاد نرخ بیت وارسال سیگنال ها در مسافت طولانی ، مشکلات مهمی در بخش فیزیکی بروز خواهد کرد.

بر این اساس عامل مهم دیگری برای ارزیابی سیستم های مخابراتی به نام " پهنای باند " شناخته و معرفی شد که ظرفیت انتقال فیبر را تعیین می کند و یکی از مشخصه های مهم در تعیین کیفیت وکمیت انتقال است .

عامل مهمی که باعث محدودیت پهنای باند می گردد " پاشندگی یا اعوجاج سیگنال " می باشد .

پاشندگی (اعوجاج سیگنال) (Dispersion)

اگر جسمی دارای ضریب شکست n باشد و n تابعی از طول موج باشد آن جسم " پاشنده " است.

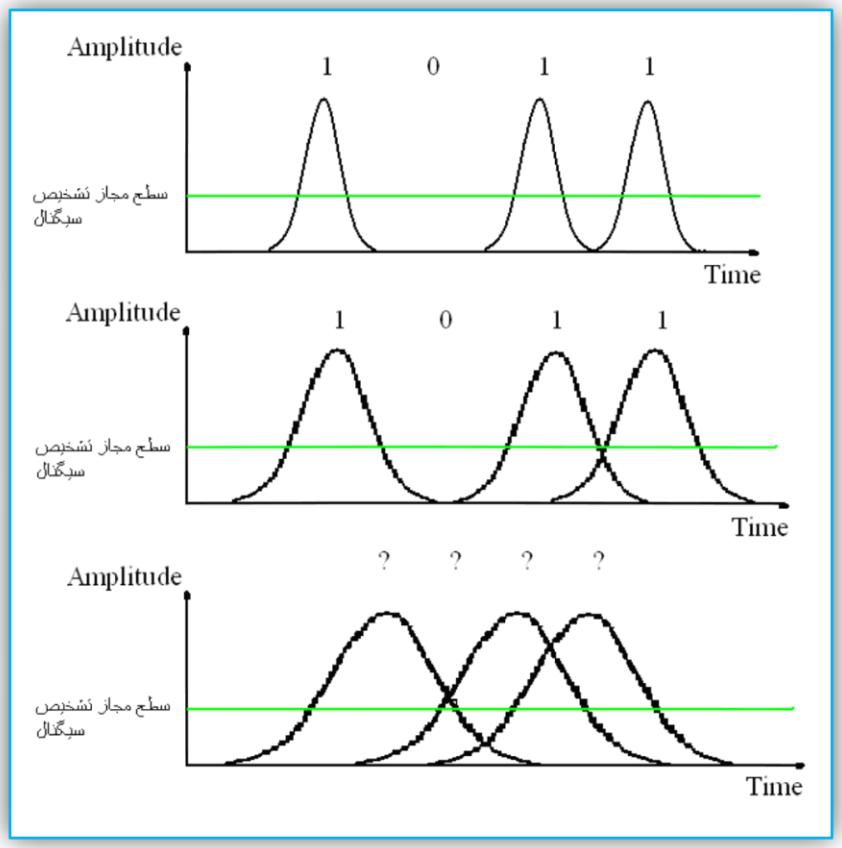
از آن جا که مواد فیبر از دو ضریب شکست متفاوت n1 و n2 (به ترتیب مربوط به هسته و پوشش) تشکیل یافته است لذا فیبر نوری یك محیط پاشنده است ، به طور کلی هرچه اعوجاج یا پاشندگی کمتر باشد پهنای باند بیشتر است.

پاشیدگی یا تفرق ، باعث پهن شدن سیگنال پالس نوری در طول موج فیبر می شود. پهن شدن باند ارسالی (ارسال سیگنال آنالوگ) و پهن شدن پالس (ارسال سیگنال دیجیتال) در طول فیبر نوری، باعث تداخل اطلاعات و اعوجاج و بالاخره عدم تشخیص آن در مقصد می شود.

تعریف : افزایش پهنای نوری در طول انتشار در یک موجبر بر حسب پیکو ثانیه در کیلومتر نسبت به تغییرات یک نانومتر را پاشیدگی گویند .

ازدیاد پاشندگی باعث افزایش نرخ خطای انتقال (BER) می گردد ، به طوری که به علت گسترده شدن پهنای پالس مثلاً اطلاعاتی که به صورت 1011 ارسال میشود در مقصد به شکل 0111 دریافت شود .

مثلاً شکل زیر :



به منظور کاهش میزان پاشیدگی تارهای نوری تک مدی در طول موج 1550 نانومتر ، به ساخت تارهای مخصوصی پرداخته شده است که ازآن جمله می توان به تارهای نوری با

پاشیدگی متعادل شده (DCF) اشاره کرد ؛که به علت ساختار خاص آن فرایند پاشیدگی در طول تار نوری متعادل می گردد.

انواع پاشیدگی :

۱ - پاشیدگی رنگی Chromatic Dispersion (CD)

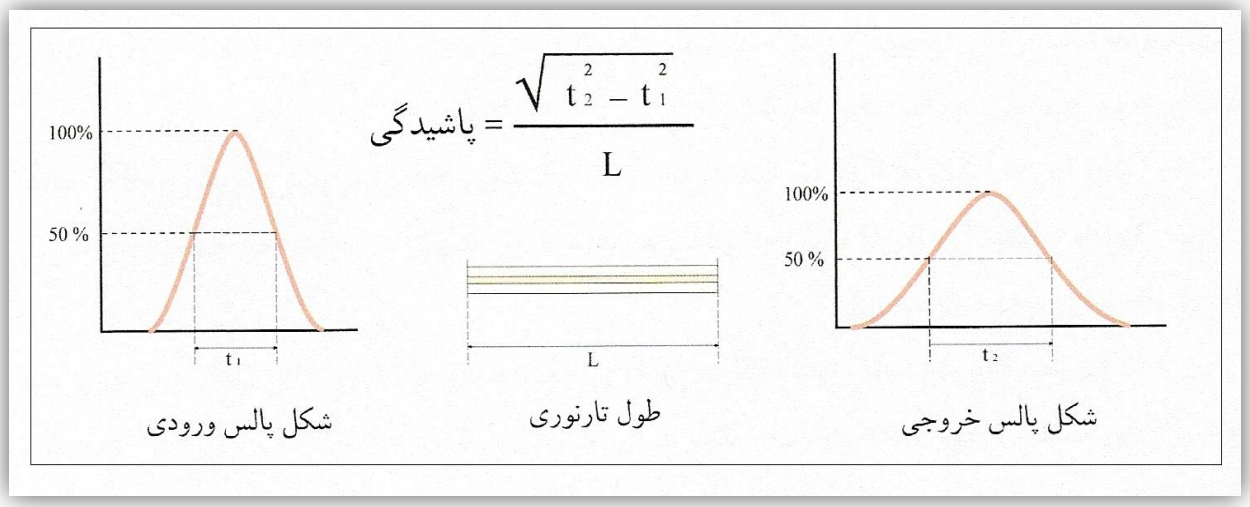
۲ - پاشیدگی قطبی شدگی Polarization Mode Dispersion (PMD)

۳ - پاشیدگی ساختار تار نوری یا پاشیدگی بین مدی Mode Dispersion

۱ - پاشیدگی رنگی : (Chromatic Dispersion)

پهن شدن یك پالس ، که توسط یك مد حمل می شود را پاشندگی درون مدی و اغلب به نام پاشندگی کروماتیک می خوانند. این پدیده در نتیجه وابستگی سرعت گروهی به طول موج به وجود می آید؛ و چون پاشندگی درون مدی به طول موج وابسته است بنابراین اثر آن در اعوجاج سیگنال با افزایش پهنای طیف منبع نور افزایش میابد . این پهنای طیف محدوده طول موجهایی است که توسط منبع نور تابش می شود . پهنای طیف معمولاً به صورت مقدار مؤثر (RMS) مشخص می گردد .

مثلاً اگر طول موج ماکزیمم تابش نور در یک دیود نوری برابر 850 nm باشد ، پهنای طیف مؤثر آن تقریباً برابر 40 nm خواهد بود به این معنی که بیشترین قدرت نوری منبع در محدوده طول موجهای 870 الی 830 نانومتر تابش می نماید . پهنای طیف دیودهای لیزری به مراتب باریکتر از LED است و در حدود 4 الی 0.1 نانومتر میباشد .



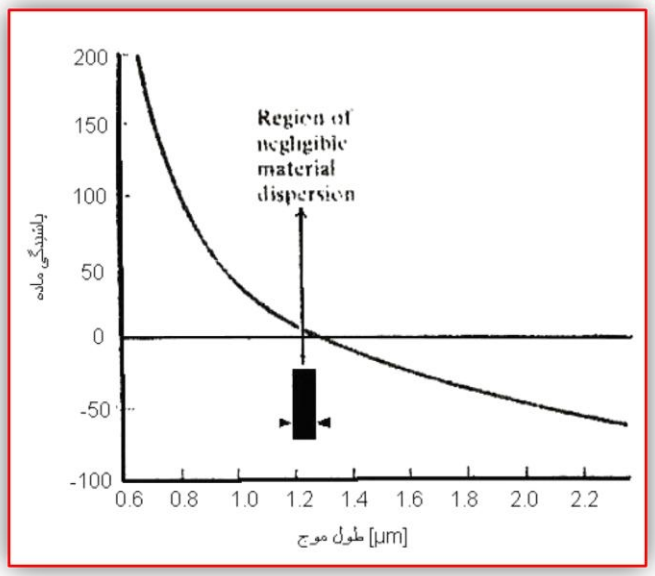
پاشیدگی رنگی به دو دسته پاشیدگی ماده و پاشیدگی موجبر تقسیم میشود.

۱. پاشیدگی ماده (پاشیدگی عارضی) (Material Dispersion)

با توجه به اینکه موج انتشار یافته در موجبرها دقیقاً تک فام نبوده و دارای طیفی برابر $\Delta\lambda$ میباشد و از آنجا که سرعت انتشار نور در موجبر با طول موج رابطه مستقیم دارد ، از اینرو طول موجهای متفاوت ولو اینکه به یکدیگر بسیار هم نزدیک باشند ، به خاطر داشتن سرعت های متفاوت در انتهای مسیر همزمان دریافت نمی شوند .

نتیجه اینکه وقتی که از منبع نور لیزر که دارای پهنای طیف کمتری نسبت به منبع نور LED استفاده کردیم ، مشاهده شد که پاشندگی ماده نیز کاهش پیدا کرد .

در شکل زیر مقدار پارامتر پاشندگی ماده (M) به صورت تابعی از طول موج برای سیلیکای خالص نشان داده شده است . می بینید که در ناحیه طول موج $1.3\ \mu m$ مقدار پارامتر گستردگی ماده صفر است .



۲. پاشیدگی موجبر (ذاتی) (Waveguide Dispersion)

با توجه به اختلاف ضریب شکست دو بخش تار نوری و وابستگی سرعت انتشار به ضریب شکست ، امواج اپتیکی در داخل هسته و پوشش با سرعت های یکسانی حرکت نمی کنند و از این رو در انتهای مسیر همزمان دریافت نشده و باتاخیر زمانی همراه خواهند بود .

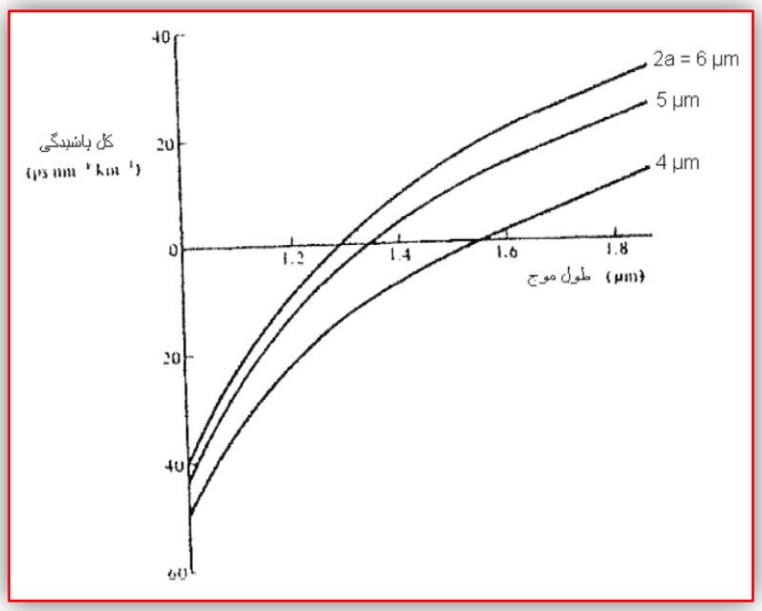
در فیبر های چند مدی عموماً پاشیدگی موجبر در مقایسه با پاشندگی ماده خیلی کوچک و قابل اغماض است ؛ اما برای فیبرهای تک مدی پاشیدگی موجبر مهم است و مقدار آن در حدود همان پاشندگی ماده است به عبارت دیگر در فیبر های تک مدی انتشار امواج محدود به هسته نبوده و در حدود 20% از این نور از طریق غلاف منتقل می گردد و چون ضریب

شکست غلاف از هسته کمتر است لذا سرعت انتشار در غلاف از هسته بیشتر است وچون نور منتشره در غلاف و هسته از یک مد واحدی هستند ، سرعت مؤثر انتشار مقداری بین سرعت در هسته و سرعت در غلاف خواهد بود .

سرعت مؤثر انتشار تابع ضریب شکست و ضریب شکست تابع طول موج میباشد ؛ در نتیجه سرعت مؤثر انتشار با طول موج نیز تغییر می کند، بنا براین پاشندگی موجبر تابعی از طول موج خواهد بود .

مقدار پاشندگی موجبر علاوه بر طول موج به ساختمان و ماده فیبر نیز بستگی دارد .

در یک فیبر تک مدی می توان طول موجی را مشخص کرد که در آن کل پاشندگی صفر باشد و این موقعی پیش می آید که پاشندگی ماده و موجبر یکدیگر را کاملاً خنثی کنند و در محدوده طول موج 1.7 الی 1.3 میکرومتر میتوان به حداقل پاشندگی دست یافت .



همانطور که درشکل بالا می بینید ، کل پاشندگی ماده و موجبر برای یک فیبر تک مدی درطول موجهای 1.27 و 1.32 و 1.55 میکرومتر که بستگی به قطر هسته فیبر دارد تقریباً صفر می باشد . چون در طول موج 1.55 μm ، مقدار تضعیف خمش ضعیفتر از بقیه طول موجها است و وقتی بخواهیم فواصل برای تکرار کننده ها به حداکثر مقدار برسد باید به سمت طول موجهای بلند تر (1.55 μm) برویم ، بنابراین در این طول موج کمترین تضعیف را می توان برای فیبر های تک مدی به دست آورد که البته برای بدست اوردن حداقل پاشندگی در این طول موج باید :

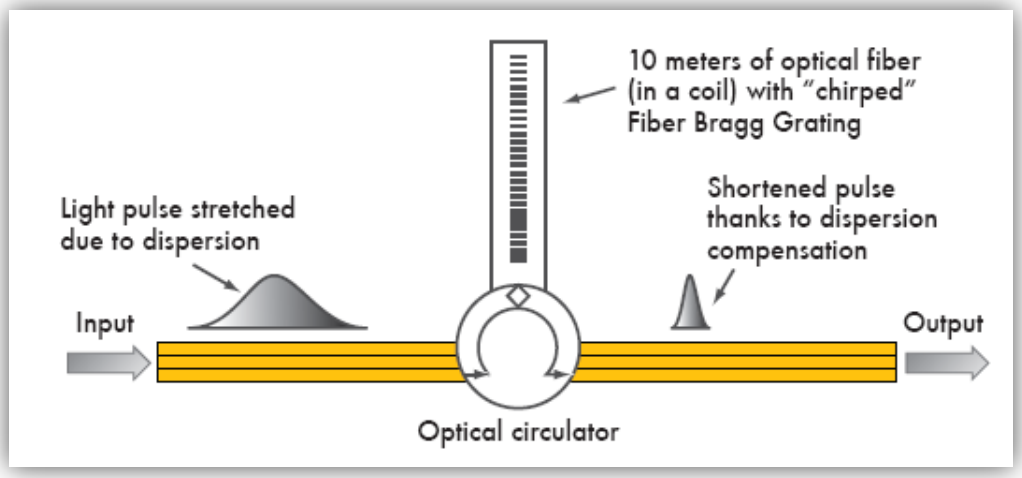
- مقدار پا رامتر قطع V را کم کرد
- اخلاف نسبی ضرایب شکست (Δ) باید زیاد و در حدود 0.6 الی 1.8 درصد باشد
- تزریق مناسب اکسید ژرمانیوم (GeO_2) در حدود 3%

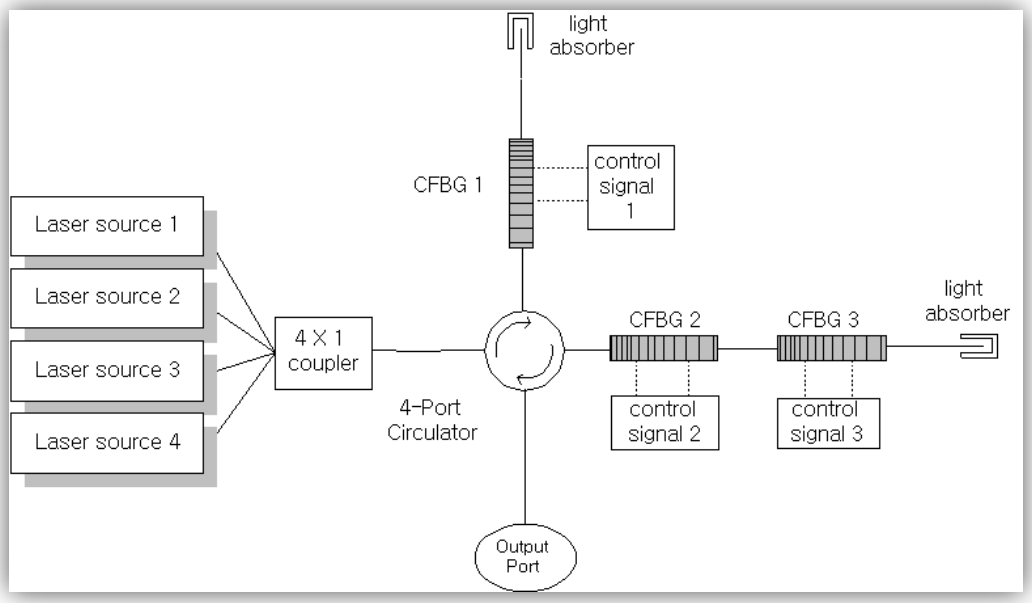
در جدول زیر چند نمونه جبران ساز پاشیدگی رنگی را می بینید:

(Dispersion Compensation)

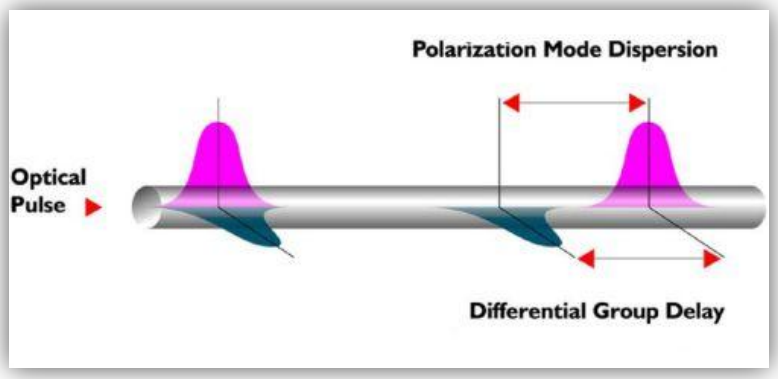
نوع	سطح تکنولوژی	فشردگی	وضعیت متداول یا کنونی
Dispersion Compensation Fiber (DCF)	بالا	پایین	8*40 Gbit/s 240 km
Chirped Fiber Bragg Gratings (CFBG)	متوسط	بالا	40 Gbit/s 109 km
Mid span Spectral Inversion (MSSI)	پایین	پایین	40 Gbit/s 217 km

در شکل زیر میتوانید یک نمونه جبران ساز پاشیدگی را ببینید:





۲ -پاشیدگی قطبی شدگی (Polarization Mode Dispersion)

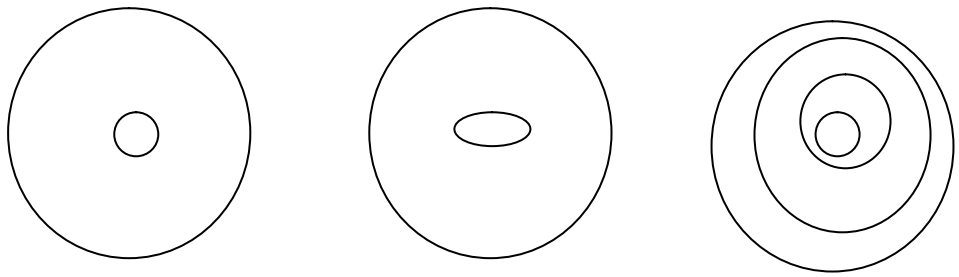


اصولاً امواج الکترومغناطیسی ولو اینکه تک فام باشند ، دارای دو میدان قطبی شده به نام های Eigenmode یا Orthogonal Polarizations در جهات طولی تار نوری و نیز شعاعی بوده که بر هم عمود هستند . هر یک از این دو میدان ، سرعت انتشار متفاوتی نسبت به دیگری داشته که به این دلیل همزمان دریافت نخواهد شد .

بنابراین به علت اختلاف سرعت حرکت آنها ، پاشیدگی اضافی در پالس دریافتی ایجاد خواهد گردید . این نوع پاشیدگی تقریباً مشابه پا شیدگی مد بوده با این تفاوت که حالت اخیر بیشتر برای تارهای نوری تک مدی بوجود خواهد آمد .

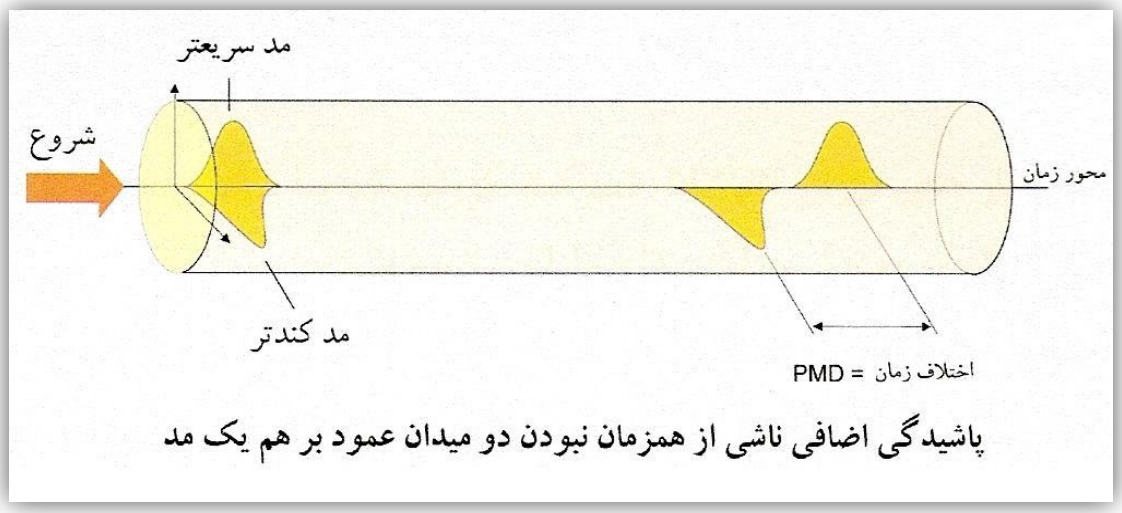
بزرگترین علت ایجاد PMD در اثر نامتقارن بودن فیبر است و عواملی مانند عدم دایروی شکل بودن مقاطع تارهای نوری و یا وجود تنش های داخلی در موجبرها ، خمشهای اضافی ، تغییر درجه حرارت ، فشارهای جانبی وارد شده به آنها ، تغییراتی در ضریب شکست دو محور تارهای نوری ایجاد شده که عدم هماهنگی در سرعتهای انتشار دو میدان قطبی شده یک مد را به همراه خواهد داشت .

یکی از علل ایجاد فشار مکانیکی ، نزدیک بودن به منابع ارتعاشی می باشد ، مثلا فیبرهای کنار راه آهن و یا وزش باد در فیبر های هوایی باعث افزایش PMD می شود .



استرس هسته بیضی شکل هسته دایره ای شکل

شکل زیر حالتی را نشان میدهد که در آن ضریب شکست در جهت صفحه X (امتداد طولی) بیشتر از ضریب شکست درجهت صفحه Y (امتداد شعاعی) میباشد.



پاشیدگی اضافی ناشی از همزمان نبودن دو میدان عمود بر هم یک مد

طی سالهای متمادی همواره فکر اندیشمندان بر این موضوع متمرکز گردیده بود که احتمالاً با افزایش سرعت انتقال، فاصله و طول موج کار، عوامل محدود کننده دیگری در شبکه ظاهر گردیده که تأثیر زیانباری برای شبکه در پی خواهند داشت . البته چنین مشکلی تا سرعت 2/5 گیگابیت بر ثانیه هرگز پدیدار نگردید و اشکالات جدید زمانی شکل ملموسی به خود گرفت که سرعت انقال از این مقدار هر فراتر رفت .

این پدیده مخرب که محدودیت زیادی در شبکههای سرعت بالا ایجاد نموده است و تا اوایل سال 1990 کم اهمیت تلقی میگردید، به عنوان PMD خوانده میشود . زمانی که سرعت انقال به 10 و یا 40 گیگابیت بر ثانیه افزایش مییابد ، PMD به عنوان یکی از عوامل اصلی تغییر شکل سیگنال ، تأثیرات منفی خود را آشکار خواهد نمود .

PMD باعث افزایش پهنای پالس نسبت به زمان و فاصله گردیده و در هم رفتگی پالسهای مجاور را شامل میشود که در نتیجه آن افزایش نرخ خطای انتقال را بدنبال خواهد داشت .

از آنجا که تولید کنندگان تارهای نوری در ابتدا مقدار PMD را اندازهگیری نمیکردند، بالغ بر 20 الی 30% از تارهای نوری که قبل از سال 1990 ساخته شده است و در حال حاضر در شبکههای دنیا در حال کار هستند مشکل PMD دارند . در سال 1996 یک سلسله اندازه گیری روی 1000 مسیر کابل نوری انجام گردید که حدود 80% این کابلها دارای ضریب PMD کمتر یا مساوی $\frac{Ps}{\sqrt{\mathrm{Km}}}$ 0/8 و 25% آنها دارای مقادیر کمتر یا مساوی $\frac{Ps}{\sqrt{\mathrm{Km}}}$ 0/2 بودند که طبیعتاً بخش عمده شبکههای مورد آزمایش نیاز به ترمیم PMD داشته است .

بر اساس پیشنهادات اتحادیه بین المللی مخابرات (ITU) در شمارههای G650 و G655 ، حداکثر ضریب پاشیدگی ناشی از میدانهای قطبی شده (PMD) برابر است با 0/2 $\frac{Ps}{\sqrt{\text{Km}}}$ ولی در عمل میانگین مقدار PMD کابلهای تولید کنندگان مطرح، به مراتب پائین تر از این مقدار و حتی کمتر از $\frac{Ps}{\sqrt{\text{Km}}}$ 0/08 میباشد .

به عنوان مثال تارهای نوری NZDS شرکت کورنینگ با نام تجاری LEAF برای مقدار میانگین PMD کمتر از 0/04 و مقدار حداکثر 0/1 طراحی شده است .

امروزه به منظور مقابله با پدیده فوق در شبکههای با سرعتهای بالا ، به طراحی و ساخت انواع خاصی از تارهای نوری جهت کنترل و یکسان سازی سرعت انتشار دو مولفه فوق پرداخته شده که به نام تارهای نوری PMF و یا (Polarization Maintaining Fiber) خوانده میشوند .

برای این کار هسته تار نوری را به صورت بیضی شکل ساخته و یا تغییراتی در نحوه توزیع ضریب شکست پوشش ایجاد میکنند ، تا سرعت انتشار هر دو میدان قطبی شده یکسان گردد .

ضمناً برای جبران و کاهش مقدار PMD در یک مسیر بایستی از جبران کنندههای مخصوصی که به نام (PMDC) شهرت دارند و قبل از گیرنده سیستمهای WDM و یا DWDM قرار می-گیرند ، استفاده شود که موارد و تجهیزات زیر نیز در طراحی و ساخت آنها لحاظ شده باشد :

- وسیلهای جهت آشکار سازی و سنجش حالت و درجه قطبی شدگی تارهای نوری .
- یک دستگاه کنترل و مقایسه کننده وضعیت موجود و لحظهای قطبی شدگی تارهای نوری نسبت به شرایط نرمال و مورد نظر .
- سیستم جبران کننده اثرات تأخیری که مولفههای قطبی شده را مجدداً همتراز و همزمان نماید .

محدودیتهای ایجاد شده در شبکه به خاطر افزایش مقدار PMD

از آنجا که حداکثر مقدار PMD در طول خط نباید بیشتر از 19% طول دوام بیت باشد ، این مشخصه به عنوان عامل محدود کننده حداکثر فاصله و سرعت انتقال بایستی مد نظر قرار گیرد .

برای درک آسانتر این موضوع به ذکر مثالی میپردازیم ؛

برای خطی به طول 750 کیلومتر و مقدار متوسط ضریب PMD مجاز 0/08 ، حداکثر سرعت انتقال به صورت زیر محاسبه میشود :

حداکثر مقدار PMD مجاز کل شبکه :

$0.08\ \text{Ps} \times 750^{1/2} = 2.2\ Ps$

از آنجا که این مقدار برابر 10% دوام بیت میباشد ، طول زمان برای هر بیت برابر با 22 پیکوثانیه شده که درنتیجه سرعت انتقال خط در این شرایط میتواند به بیشتر از 40 گیگابیت بر ثانیه برسد .

بایستی توجه داشت که در صورتی که مسیر کلی شبکه نوری از چند بخش مختلف تشکیل شده باشد که دارای ضرایب PMD متفاوتی باشند ، بایستی PMD کلی را برای هر بخش جداگانه حساب کرده و از رابطه زیر مجموع پاشیدگی PMD را برای کل مسیر محاسبه نمود :

با نگرشی به این فرمول، میتوان نتیجه گیری کرد که حتی وجود یک بخش دارای PMD زیاد میتواند کل مسیر را تحت تأثیر قرار داده و پاشیدگی قطبی شده شبکه را شدیداً افزایش دهد .

به عنوان مثال اگر 4 بخش با مقادیر مختلف PMD به صورت زیر به هم اتصال داده شود :

بخش 1 با PMD برابر با 0/1

بخش 2 با PMD برابر با 0/4

بخش 3 با PMD برابر با 0/2

بخش 4 با PMD برابر با 2/5

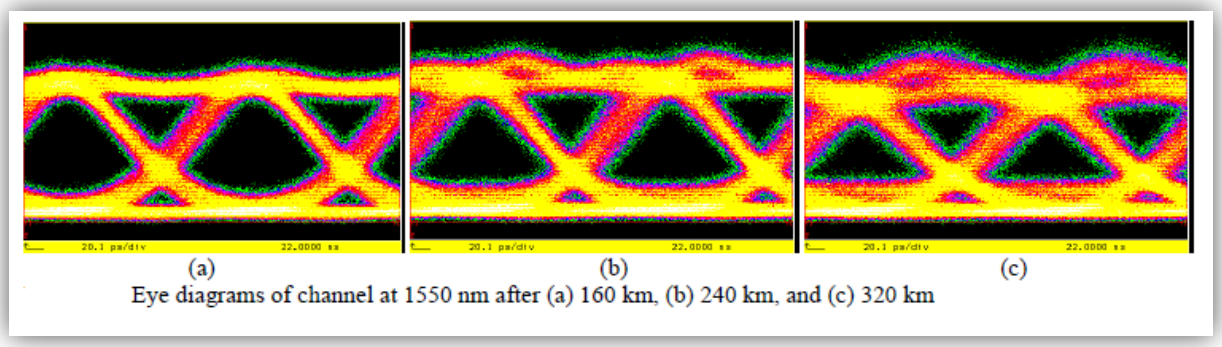
مقدار PMD کل مسیر خواهد شد :

$$PMD_t = (0.1^2 + 0.4^2 + 0.2^2 + 02.5^2)^{1/2} = 2.54$$

که تقریباً نزدیک به مقدار PMD بخش 4 بوده و مقادیر کمتر PMD سایر بخشها ، قادر به متعادل کردن PMD کل مسیر نخواهند بود .

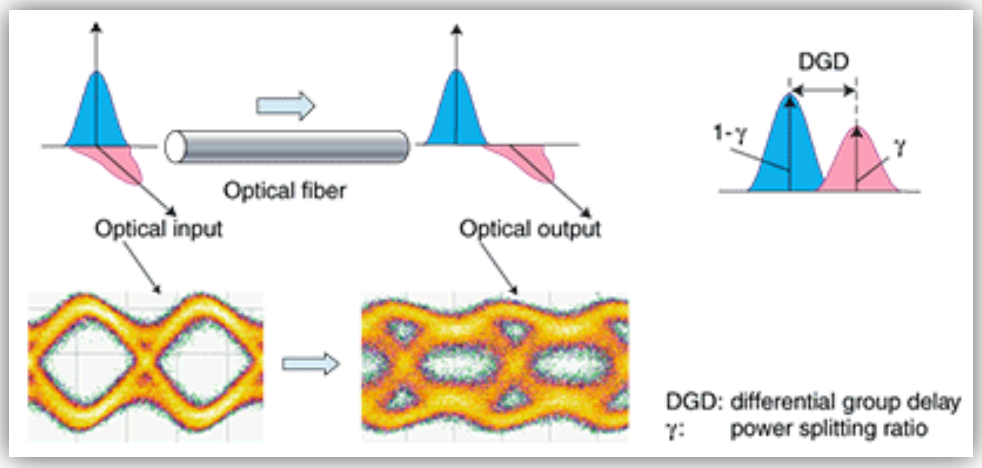
رباطه دیگری که محدودیت فاصله شبکههای تار نوری را نسبت به مقدار PMD و سرعت انتقال بیان میند به صورت زیر نوشته میشود:

$$L_{PMD} (km) = 10^4 / [\text{سرعت انتقال} (Gb/s) \times PMD (ps / \sqrt{km})]^2$$



(شکل بالا مقدار اعوجاج به وجود آمده در تار نوری بعد از فواصل مختلف را نشان می دهد.)

می توان PMD را به معنی Differential Group Delay = DGD (اختلاف تاخیر گروهی) ویا تاخیر زمانی بین مدهای پلاریزه عمود بر هم تعبیر کرد . این تاخیر زمانی در سیستمهای دیجیتالی باعث پهن شدن سیگنال و در سیستمهی آنالوگ باعث اعوجاج (Distortion) موج می شود .



یه کار بردن تکرار کننده (Regenerator) برای قابل استفاده شدن سیگنال در انتهای یک مسیر بهترین وتنها راه نیست بلکه پر هزینه ترین راه است ؛ بنابراین یک روش با ارزش تر این است که مشکل PMD را قبل از اینکه سعی در دکد کردن سیگنال داشته باشیم در انتهای مسیر برطرف کنیم .

جبران ساز PMD (The PMD Compensator) :

چندین تکنولوژی برای جبران کردن PMD وجود دارد :

- ابزاری مکانیکی که بخشی از فیبر را فشرده می کند تا بتوان پالسهای پلاریزه بیتهای نوری را بنحوی تعدیل بخشد . بعبارت دیگر یک PMDC مکانیکی ، فشار

وارد بر فیبر را تعدیل می کند . یکی از مشکلات این روش این است که ابزارهای مکانیکی بیشتر مستعد خرابی هستند .

- ابزار الکترونیکی که بعد از دکد در گیرنده به کار گرفته می شود (تنظیم الکترون ها بمنظور کاهش خطای بیت).

اولین مانع برای این روش ، برطرف کردن یک مشکل اپیکی در لایه های الکترونیکی است .

معتبر ترین و موثر ترین تکنولوژی ساخت PMDC استفاده از جهیزات اپتیکی تطابق پذیر بمنظور تعدیل کردن و درست کردن پالسهایی است که دارای بیتهای نوری پراکنده شده است . ابزارهای تطابق دهنده PMDC توسط الگوریتم باهشی که توسط آنالیز بیتهای نوری عمل می کند کنترل می شود .

لازم به توضیح است که در تارهای نوری چند مدی پاشیدگی ساختار به شرح زیر نیز به موارد بالا اضافه میگردد:

۳ -پاشیدگی ساختار تار نوری یا پاشیدگی بین مُدی

(Mode Dispersion or Inter modal Dispersion)

در تار های نوری چند مدی به علت اینکه هر مد مسیر مختلفی را نسبت به مد دیگر طی می کند ، در آخر مسیر مدهای مختلف با زمان تاخیری متفاوتی دریافت میشود و از این رو پاشیدگی مد در این حالت بوجود خواهد آمد .

یا به عبارتی دیگر این پاشندگی مربوط به مقادیر مختلف تأخیر گروهی برای مدهای متفاوت در یك فرکانس معین است . یعنی تعداد زیادی مد می تواند در طول فیبر منتشر شود ، بنابراین مدهای مختلف مسافت های متفاوتی را در فیبر طی کرده و در نتیجه در زمان های مختلف به انتهای فیبر می رسند . این اختلاف زمان بین شعاع های نوری منتشر شده از مسیرهای مختلف با طول های متفاوت به وجود می آید و این تغییرات زمان، باعث پهن شدن پالس ، که گسترش مدال (modal Dispersion) یا پاشندگی نامیده می شود، می گردد.

محدودیت پهنای باند فیبر تك مدی به خاطر پاشندگی ماده و موج بر می باشد ؛ ولی محدودیت پهنای باند فیبرهای چند مدی ، به علت تفاوت درسرعت های گروهی مدها می باشد .

با کم کردن Δ و (NA) می توان پهن شدن پالس را کم کرد ولی در عمل هر دو عامل ذکر شده دارای محدودیت میباشد .

تزویج یا کوپلینگ مُد : (Mode Coupling)

تئوری الکترو مغناطیس نشان می دهد که مد ها در طول مسیر به یکدیگر تبدیل می شوند ، در عمل هم به علت خمش فیبر یا ثابت نبودن محور فیبر یا ثابت نبودن سطح جدایی هسته با پوشش ، مد های پایین به مد های بالاتر تبدیل می گردد . آنچه مهم است این است که مدهای بالا در طول مسیر در اثر عوامل بالا حذف می شود . باید در نظر داشت که این اشکال با انتخاب مواد وکیفیت ساخت فیبر از بین نمی رود . این خاصیت را کوپلینگ مد یا مخلوط شدن می نامند .

تزویج مد در موسط تاخیر انتشار مدها تاثیر می گذارد و بهمین علت موجب کاهش پاشندگی بین مدی می شود . نتیجه اینکه با وجود کوپلینگ مد پهنای باند افزایش پیدا می کند .

فصل چهارم

انواع تارهای نوری

انواع تارهای تک مدی استفاده شده در سیستم های انتقال مخابراتی :

۱ - تارهای تک مُدی ساده

Single Mode Fiber (SMF)

or Standard Single Mode Fiber (SSMF)

تحت استاندارد ITU-T G.652 a , b

این نوع تار اولین تار تک مُدی تولید شده وهمچنین اولین تار نوری که به طور فراگیر درشبکه های مخابراتی مورد استفاده قرارگرفت و در حال حاضر هم ارزان ترین نوع تار است .

این تار قادر است در دو طول موج 1310nm و 1550nm امواج نوری را منتقل کند.

بر خلاف تارهای چند مدی که قطر هسته پارامتر مهمی برای انتقال اطلاعات محسوب میشود ، در تارهای تک مدی قطر میدان مد اصلی به جای قطر هسته کاربرد دارد .

قطر میدان مد (MFD) درطول موج 1310 نانومتر حدود 10 تا 12 درصد از قطر هسته بزرگتر است یعنی مقدار آن 0.4 ±9.2 است و در طول موج 1550 نانومتر مقدار آن 0.8 ±10.4 است .

به عنوان مثال ضریب شکست لایه های یک تار SM را می توانید در زیر مشاهده کنید :

لایه های تار نوری	ضریب شکست
هسته	1.475
پوشش	1.471
روکش	1.52

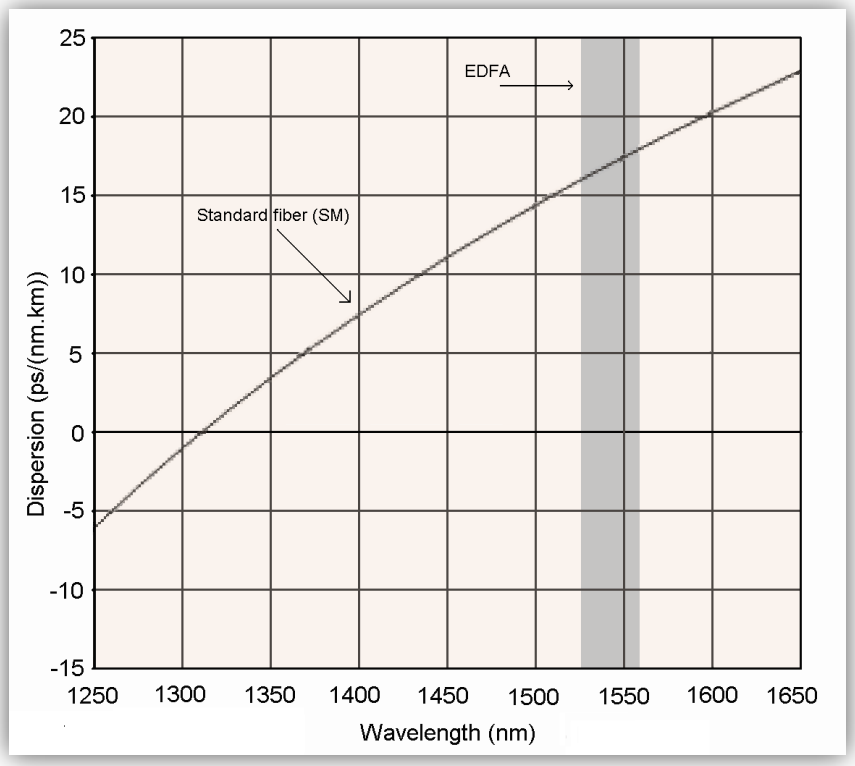
این تار در پنجره 1330 nm دارای پاشندگی صفر بوده و حداقل تضعیف آن در پنجره 1550 nm است . نکته قابل ذکر این است که درپنجره 1550 nm علیرغم تضعیف کم ، پاشندگی درآن زیاد بوده و در پنجره 1330 nm علیرغم پاشندگی صفر، دارای تضعیف بالاتری است.

این نوع تار جهت کار درپنجره 1330 nm طراحی شده است وبا توجه به مسافت و نرخ بیت ارسالی روی آن درسالهای اولیه استفاده از تارنوری کاربرد فراوانی داشته است به طوریکه بخش اعظمی از شبکه های موجود مخابراتی از این نوع تار استفاده می نمایند و دربرنامه پنج ساله اول توسعه نیز از این نوع تار استفاده گردیده است .

پا شندگی و یا در اصل پاشندگی کروماتیک (Chromatic Dispersion) این تار در جدول و شکل زیر نشان داده شده است :

در طول موج 1310 نانومتر = $D \leq 3.5$ ps/(nm.km)

در طول موج 1550 نانومتر = $D \leq 18$ ps/(nm.km)



با توجه به مقدار تضعیف این تار درپنجره 1330 nm کـه محدودیـت فاصله را درپی دارد اسـتـفـاده از پـنـجـره 1550 nm به طور روز افزونی افزایش یافت . ولی به دلیل پاشـندگی بالای این نوع تار در این پنجره و افزایش نرخ بیت های ارسالی ، عامل محدودکننده پاشـندگی خود را نشان می دهد . به این دلیل طراحان و تولیدکنندگان فیبرنوری ، تار نوری جدیدی را طرح‌ی نمودندکه ضریب پاشـندگی آن در پنجره 1550 nm صفر می باشد ، به عبارت دیگر ضریب پاشـندگی صفر از پـنجـره 1330 nm بـه پـنجـره 1550 nm منتقل گردیده است .

۲ - تارهای نوری DS

Dispersion Shifted Fiber (DSF)

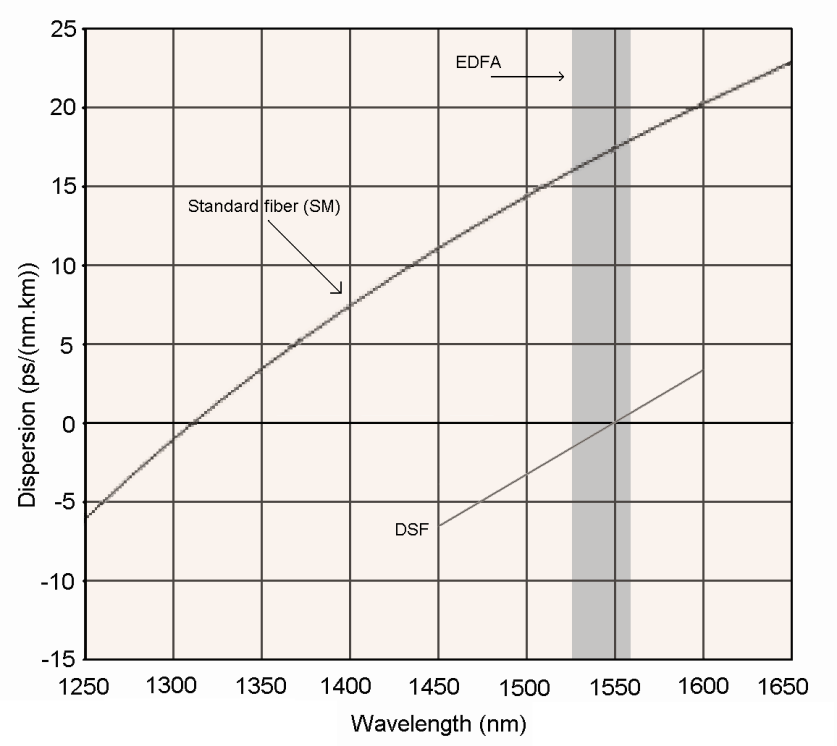
تحت استاندارد ITU-T G.653 a , b

همانطور که گفته شد این تار در راستای از بین بردن پاشیدگی در طول موج 1550 نانومتر تولید شد و به نام تارهای نوری با پاشیدگی انتقال یافته صفر خوانده می شوند .

با توجه به اینکه فیبرنوری درپنجره 1550nm، تضعیف کمتری نسبت به پنجره 1310 nm دارد استفاده از این پنجره توجه استفاده کنندگان را جلب نمود و تولید ادوات و تجهیزات نوری دراین پنجره افزایش چشمگیری پیدا کرد . به طوریکه در طول چند سال پنجره 1550 nm درکاربردهای مخابراتی از اهمیت ویژه ای برخوردارشد .

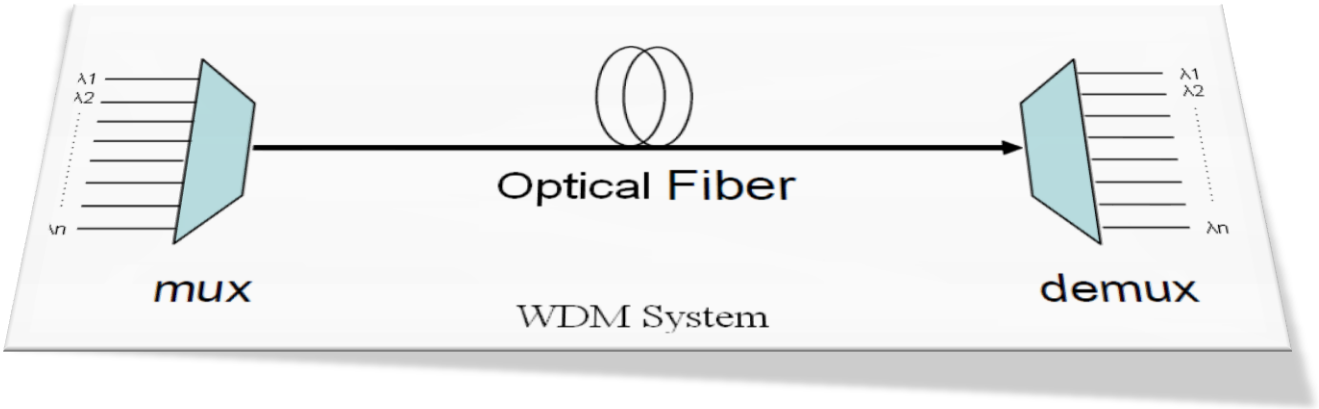
این تار نوری با توجه به افزایش بیت ریت ارسالی و طول مسیر ، توسط طراحان ارائه و در شبکه های مخابراتی برای فواصل طولانی مورد استفاده قرار گرفت .

قطر میدان مد این تار 2 االی 3 میکرون کمتر از تارهای تک مدی است (7.4 μ m تا 9) وأفت آن هم در حدود تارهای تک مدی است .
همانطور که در شکل زیر مشاهده می شود پاشندگی (CD) این تار در طول موج 1550 صفر است :



(شکل بالا مشخصه پاشندگی این تار را برحسب طول موج و مشخصه تار SM استاندارد نشان می‌دهد .)

نیاز روز افزون به ظرفیت زیاد و محدودیت فراوری همتافتگری تقسیم زمانی یا TDM (Time Division Multiplexing) ، طراحان سیستمهای مخابراتی را به سمت استفاده از فراوری جدیدی به نام همتافتگری تقسیم طول موج (Wave length Division Multiplexing) WDM و (Dense - WDM) DWDM سوق داد.
در این فراوری امکان ارسال ، دریافت و یا ارسال و دریافت همزمان چند طول موج نوری بر روی یك تار امکان پذیر است . هر یك از طول موجها را یك کانال نوری می نامند که بطور مستقل اطلاعات مجزایی را حمل می نمایند .



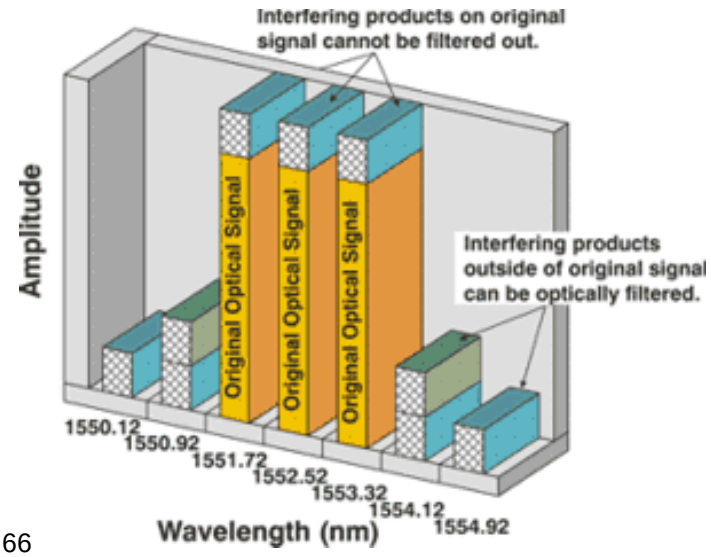
بدلیل درخواست و کاربرد زیاد فراوری DWDM برروی تارهای نوری ، به منظور افزایش ظرفیت شبکه‌های مخابراتی ، اشکالاتی در انتقال این فراوری از طریق تار DSF بروز نمود . این مشکلات و محدودیتها درتار SM استاندارد کمتر از تار DSF بود . لیکن محدودیت قبلی تار SM استاندارد که همانا پاشندگی زیاد آن دراین پنجره بود کماکان وجود داشت .

محدودیت های تار DSF جهت بکار گیری فراوری DWDM بدلیل بروز اثرات غیر خطی شیشه است که این اثرات غیر خطی عبارتند از:

- اختلاط چهار موجی	(FWM)	- Four Wave Mixing
- خود مدوله سازی فاز	(SPM)	- Self Phase Modulation
- مدوله سازی متقاطع فاز	(XPM)	- Cross Phase Modulation
- پراکنش «رامان» انگیخته	(SRS)	- Stimulated Raman Scattering
- پراکنش «بریلوین» انگیخته	(SBS)	- Stimulated Brillouin Scattering
- ناپایداری مدوله سازی	(MI)	- Modulation Instability

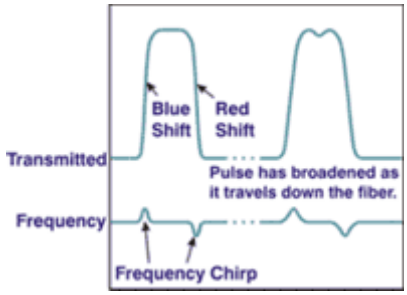
_ مهمترین اثر غیر خطی پدیده‌ی اختلاط چهار موجی (FWM) است و در پاشندگی صفربیشترین تاثیر را خواهد داشت .

این پدیده در تارهای چند کانالی رخ می دهد و سبب بروز مولفه‌های نوری ناخواسته (طول موجهای نوری جدید) می گردد که درصورت زیاد بودن تعداد طول موجها و کم بودن فاصله آنها تعداد این مولفه‌ها و مزاحمت آنها بیشتر می گردد ، زیرا فیلتر کردن طول موجهای مطلوب به سختی انجام شده و گاهاً این طول

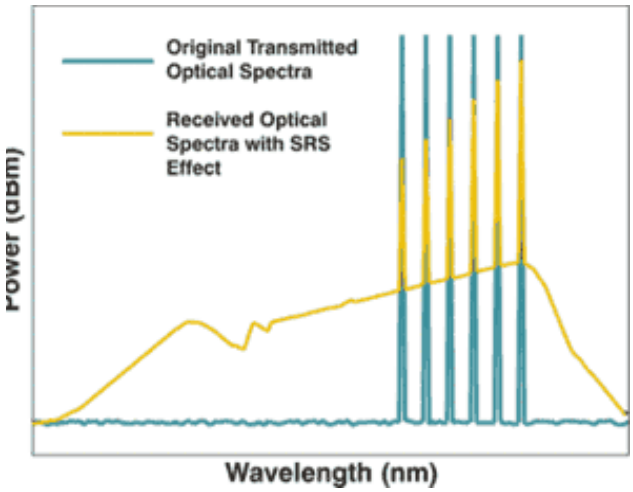


موجهای ناخواسته دقیقاً روی طول موجهای اصلی قرار می گیرد که به هیچ وجه قابل فیلتر کردن نبوده وسبب هم شنوایی می گردد . حال از آنجایی که اساس کار سیتم های WDM در محدوده طول موجی تقویت کننده های اربیومی (EDFA) است و رنج این تقویت کننده محدود به 35 nm میشود در نتیجه مجبور به کاهش فضای کانالها هستیم ، چون افزایش کانال ها باعث پدیده هم شنوایی بین کانالها میشود . بنابراین تارهای DSF دارای محدودیت زیادی برای به کارگیری درسیستمهای DWDM است.

بهترین راه حل برای FWM ، تارهایی با بزرگترین پاشیدگی است .



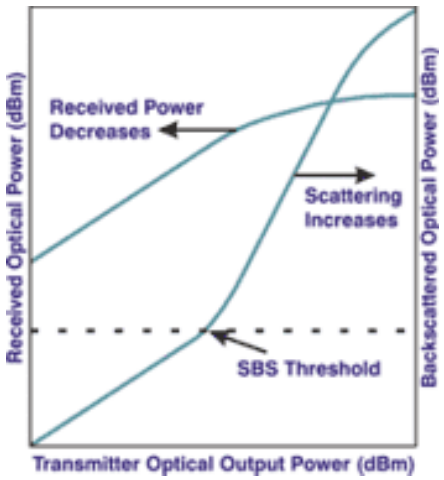
_ خود مدوله سازی فاز (SPM) پدیده دیگری است که دراثر چگالی نوری زیاد درمحیط انتقال شیشه بوجودمی آید . SPM بدلیل وابستگی ضریب شکست شیشه به توان نوری ودرنتیجه وابستگی سرعت انتقال نور درشیشه به توان آن بوجود می آید . به این ترتیب با تغییر توان نوری تغییرات فازی بوجود آمده دراثر تغییر سرعت به ترتیبی خواهد بود که سبب پهن شدگی پالس می گردد که اصطلاحاً بـــه آن جابه جایی سرخ (red-shift) و جابه جایی آبی (blue-shift)می گویند . این پدیده بیشتر درسیستمهای تك کاناله با نرخ بیت بالا مزاحمت ایجاد می کند ودر قدرت ورودی بیش از 30 mW این پاشیدگی افزایش پیدا میکند .



_ یکی دیگر از اثـــرات غـــیـر خـطی، پدیده مدوله سازی متقاطع فاز (XPM) است که درسیـــستمهای چند کاناله (WDM , DWDM) سبب جفت شدگی فاز ی بین کانالها یا هم شنوایی و پهن شدگی پالس می گردد .

_ دو پدیده پراکنش نوع SRS و SBS ، بیشتر درزمینه تضعیف انرژی نورانی اثر می گذارد که به علت بالا بودن توان نوری تغذیه شده به فیبر بوجود می آید . پدیده SRS باعث از بین رفتن سیگنال و هم شنوایی و در قدرت بیش از 1 Watt رخ میدهد .

پدیده SBS هم در قدرت بیش از 10 mW رخ میدهد .



_ پدیده دیگر ناپایداری مدوله سازی یا IM است که باعث از بین رفتن سیگنال و ایجاد نویز میشود و در سرعت انتقال 10Gbit/s به بالارخ میدهد .

ضریب غیر خطی Υ بر حسب طول موج λ از فرمول زیر بدست آورد :

$$\Upsilon = (2\pi / \lambda) . (n_2 / A_{eff})$$

که در آن

λ = طول موج

n_2 = ضریب شکست غیر خطی موجبر با ضریب (2.35×10^{-20} $[m^2/W]$ برای سیلیکا)

A_{eff} = سطح مقطع موثر هسته فیبر در واحد متر مربع

نتیجه اینکه برای کوچک نگه داشتن اثرات غیر خطی باید :

1= برای کاهش ضریب غیر خطی ، باید ضریب شکست غیر خطی را کاهش بدهیم و هم اینکه سطح مقطع موثر را افزایش بدهیم .

2= ضریب پاشیدگی تار تا حد ممکن بزگ باشد ؛ در عین حال برای افزایش فاصله انتقال و همچنین افزایش حجم اطلاعات قابل حمل توسط شبکه نیاز به پاشیدگی بسیار پایینی داریم . به هر حال مشکلی در آن نیست چون بعداً می توان به وسیله بهبود دهنده های پسیو ، پاشیدگی را جبران نمود.

۳ -تارهای نوری LS

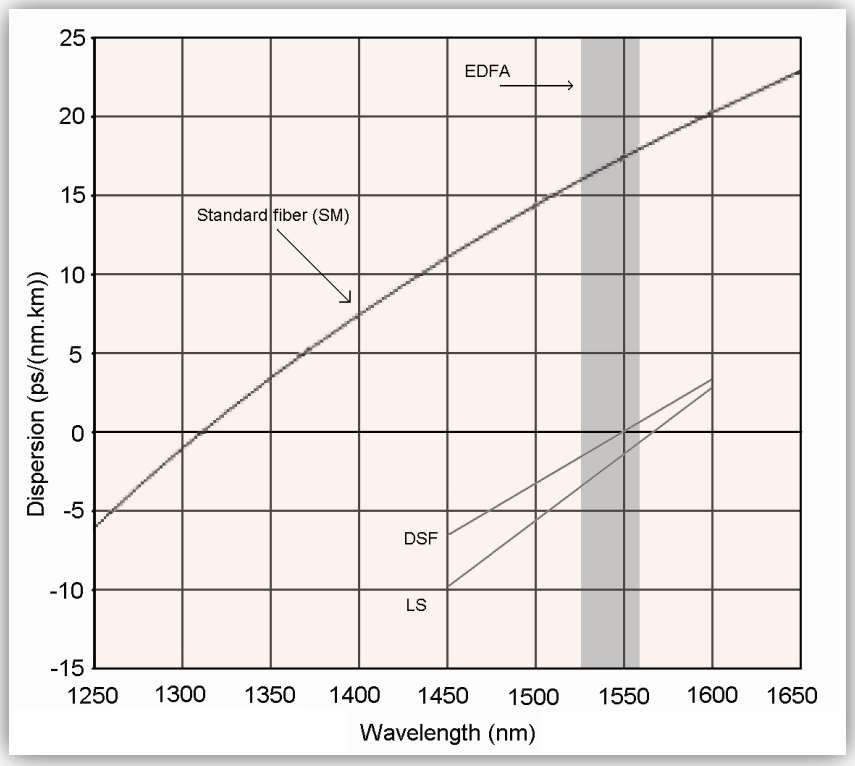
Lamda Shifted (LS)

ساخت این نوع تار اولین گام برای طراحی و تولید تارهای NZDS بوده است . به علت اشکال انتقال سیگنالهای WDM از طریق تارهای نوری نوع DS ، به ساخت تارهای LS و یا تارهای نوری با طول موج انتقال یافته ، همت گماشته شده است .

در این نوع تارها ، نقطه صفر پاشندگی کمی بعد از طول موج 1550 nm قرار می گیرد تا در محدوده باند انتقالی 1530 – 1565 nm که همان محدوده طیفی تقویت کننده های اربیومی (EDFA) است ، شاهد مقدار کمی پاشندگی منفی باشیم .

با این کار اثرات غیر خطی کاهش یافت و در نتیجه تار در شرایط بهتری برای استفاده در سیستم های WDM قرار گرفت .

پاشیدگی این تار را می توانید در شکل زیر ببینید :



۴ -تار نوری CS

Cut off Shifted (CS)

تحت استاندارد ITU-T G.654 a , b , c

در این تار های نوری ، طول موج قطع به مقدار کمی پایین تر از طول موج قطع تارهای تک مدی که تقریباً بین 1230 الی 1260 نانومتر می باشد ، انتقال یافته است .

(همان طور که قبلا گفتیم طول موج قطع ، طول موجی است که از آن طول موج پایین تر ، بیشتر از یک مد (مد اصلی) ، از داخل تاری عبور می کند و یا به عبارت دیگر ، تار نوری به صورت چند مدی در خواهد آمد.)

۵ -تارهای نوری NZDSF

Non Zero Dispersion Shifted Fiber (NZDSF)

تحت استاندارد ITU-T G.655 a , b

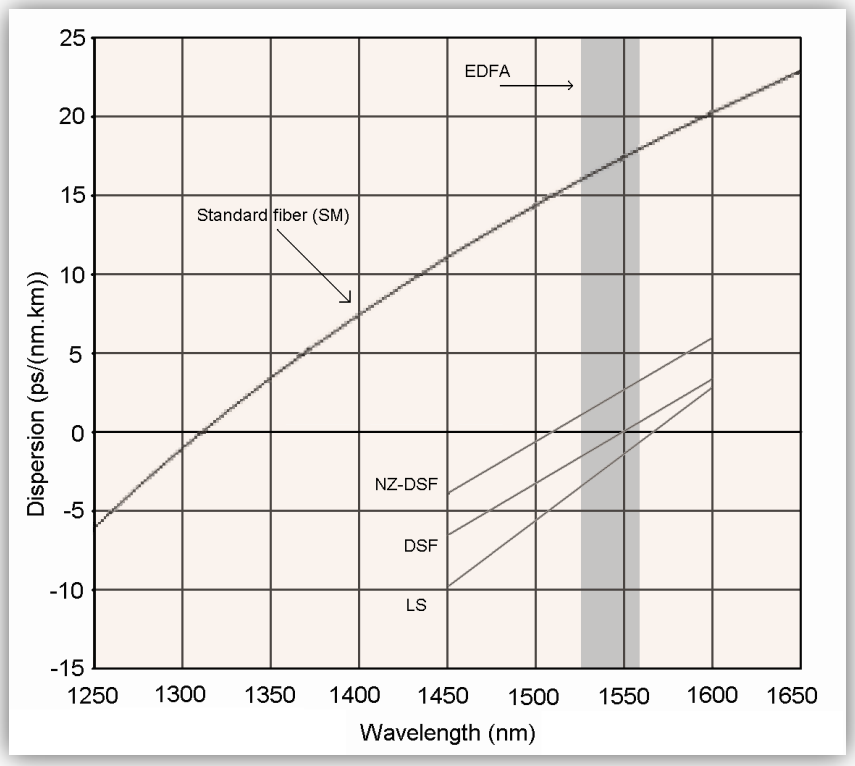
برای کم کردن اثرات غیر خطی باید سطح مقطع موثر (A_{eff}) افزایش پیدا می کرد و همینطور با توجه به محدودیتهای که ذکر شد طراحان تارنوری و پژوهش گران اقدام به طراحی و تولید تار نوری جدیدی به نام تار های NZDSF نمودند .

این نوع تار نسل بعدی تارهای DS و LS می باشند و به نام تار های با پاشندگی انتقال یافته غیر صفر شهرت دارند و همینطور که از اسم آن پیداست دارای پاشیدگی کم در طول موج 1550 نانومتر بوده ولی به هر حال مقدار آن صفر نمی باشد .

در زیر بخشی از مزیت های این تار نسبت به دیگر تارهای تک مدی قبلی آورده شده است :

- قابلیت کار در سرعت های بالا .
- قابل استفاده در سیستم های WDM و DWDM و در حال حاضر پر کاربرد ترین تار جهت استفاده در این سیستم ها می باشند .
- امکان کاربرد عملی سیستم های انتقال با سرعت های بالای 2.5 و 10 و حتی 40 گیگابیت بر ثانیه و نیز انجام مطالعات عملی و تحقیقاتی همراه با کار در آزمایشگاه بر روی سرعت هایی در حدود 1000 گیگابیت بر ثانیه .
- قابلیت استفاده در طول موج کاری تقویت کننده های نوری اربیومی .
- میزان شدت نور نسبت به فاصله از مرکز تار نوری تقریبا خطی است و میزان پاشیدگی کم غیر صفر آنها در فاصله طول موج های 1530 تا 1625 نانومتر ، باعث کاهش هم شنوایی ناخواسته ناشی از اثرات غیر خطی می گردد .

پاشندگی این تار در شکل زیر نشان داده شده است :



۶ -تارهای نوری با روکش تیتانیوم :

برای تار های نوری با مصارف خاصی ، مثلا کابل های نوری زیر دریایی ، لایه باریکی از فلز تیتانیوم را روی پوشش تار قرار داده تا استحکام مکانیکی آن بیشتر شده و از قدرت کشش بالاتری برخوردار شوند .

۷ -تارهای با افت خمش پایین :

Small Bending Loss

این نوع تارها هم برای مصارف خاصی به کار می روند و دارای قابلیت خمش پذیری بالاتری (تقریبا دو برابر) نسبت به دیگر تارهای تک مدی می باشد .

به عنوان مثال یکی از همین نوع تارها از شرکت فوجیکرا ، مقدار ظرفیت خمیدگی این تار را با شعاع خمش مجاز 15mm (تارهای معمولی دارای شعاع خمش مجاز 30mm میباشند) ارائه کرده است.

از کاربرد های این تار می توان به موارد زیر اشاره کرد :

- کاربرد در سیمهای رابط نوری (patch cord)

- استفاده در کاربردهای خانگی Fiber To The Home (FTTH)
- استفاده در شبکه های محلی Local Area Networks (LAN)

۸ -تارهای با پاشیدگی کم :

Small Dispersion Slope Non Zero Dispersion Shifted

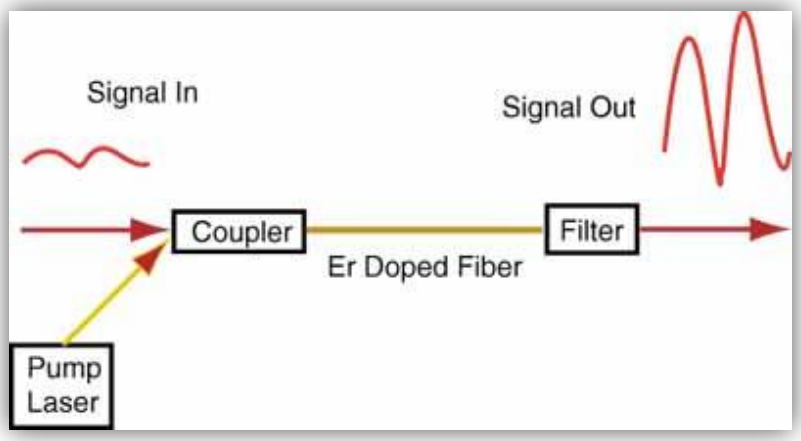
این نوع تار با کاهش شیب پاشیدگی نسبت به دیگر تارها که حتی تحت استانداردهای ارائه شده عمل کرده اند توانسته مقدار پاشیدگی را در طول موج های 1565 - 1625 nm بسیار کاهش دهند و در عمل باعث افزایش فواصل انتقال در سیستم های DWDM و در باند های C و L شده است .

۹ -تارهای نوری اربیوم دار :

Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)

اربیم **(Erbium)**، عنصر شیمیایی است که در جدول تناوبی با نشان Er وجود داشته ، دارای عدد اتمی 68 می‌باشد . اربیم ، فلز کمیاب خاکی لانتانید و نقره‌ای رنگی است که به همراه چندین عنصر کمیاب دیگر در گادولینیت معدنی در Ytterby واقع در سوئد وجود دارد .
از لحاظ تجاری منابعی که از آن برای استخراج Er استفاده می شود در هند ، استرالیا ، آفریقا ، چین و امریکای شمالی یافت می شود . کشف این عنصر توسط Carl Mosander در سال 1843 و نام این عنصر به علت شهری در سوئیس به اسم Ytterby می باشد . در سال 1934 ، Klemm و Bommer برای اولین بار از طریق واکنش کلرید بدون آب با بخار پتاسیم فلز اربیم خالص تهیه کردند.
آخرین تکنیک تولید اربیم ، استفاده از واکنش های مبادله یون است که نتیجه آن کاهش قیمت فلزات کمیاب و ترکیبات آنها در سال های اخیر است . مانند سایر فلزات نادر خاکی ویژگی این فلز (اربیم) نیز به میزان ناخالصی های موجود در آن بستگی دارد .
کاربردهای آن : فلز اربیم مثل دیگر فلزات کمیاب دارای خاصیت ابر رسانایی است . به علت رنگ صورتی آن در رنگ آمیزی بسیاری از شیشه ها و سرامیک ها به کار می رود که این رنگ به علت شارپ بودن خطوط جذبی آن است . پودر اکسید این عنصر در فیبرهای نوری و سل هایی که در فرابنفش جذب دارند استفاده می شود .
تغلیظ هسته تارهای نوری تک مدی با عنصر اربیوم یک محیط لیزری بوجود آورده که به فعال کردن آن منجر می شود ، عبور سیگنال نوری از داخل این نوع تار نوری از طریق گسیل یونهای اربیوم ، برانگیخته و تقویت شده و با استفاده از یک دیود لیزری که عمل پمپ انجام می دهد بهره تقویت آنرا بالا میبرند .

ار اینرو این نوع تارهای نوری که به نام تارهای تقویت کننده اربیومی ویا EDF شهرت دارند ، در تقویت کننده های نوری کاربرد چشمگیری یافته اند .



با استفاده از این تارها که تضعیف در آن بسیار پایین است می توان اطلاعات را با حجم 2.5Gb/s تا فاصله 900km و یا حجم 10Gb/s تا فاصله 60km بدون Regenerator حمل کرد ؛ در حالی که قبلا تار ها با طول موج 1310 نانومتر تنها تا 35 کیلومتر بدون Regenerator توانایی انتقال داشتند .

ناحیه کار تقویت کننده های اربیومی از 1525 nm تا 1563nm با اختلاف فاصله موج $\lambda\Delta$= 0.475 nm و جدیدا در باند 1570 nm تا 1610nm با اختلاف فاصله موج $\lambda\Delta$= 0.5 nm است .

می توان از فرمول زیر برای این محاسبات استفاده کرد :

$$B^2 . D . L = 10^5$$

که D= پاشیدگی (در 1550 برابر 17 است)

B= بیت رات (bit rate) یک کانال است

L= ماکزیمم مسافت بدون ریپیتر

۱۰ - تارهای با سطح مقطع موثر بزرگ (LEAF)

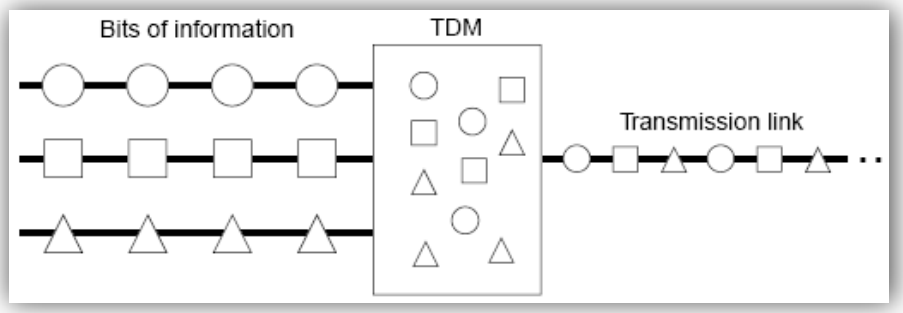
Large Effective Area Fiber (LEAF)

تارهای LEAF ، نوعی از تارهای NZDSF هستند که سطح مقطع موثر آن به مقدار 72 μm^2 رسیده است . این تارها برای سیستم های DWDM طراحی شدند و به خاطر افزایش سطح مقطع موثر آن اثرات غیر خطی در آن پایین آمده و با این شرایط می توان به سرعت های انتقالی در حدود 1000 Gbit/s دست یافت .

مقدار پارامتر های دیگر آن مثل پاشیدگی مانند تار های NZDSF است .

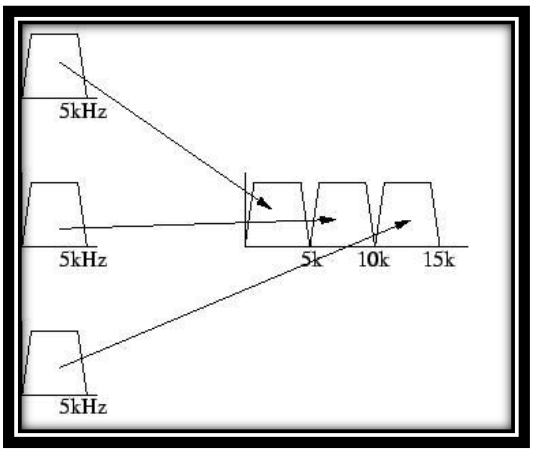
تارهای LEAF و سیستم های DWDM :

با پیاده سازی سیستمهای TDM (Time Division Multiplexing) امکان بر قراری چند تماس همزمان بر روی یک خط واسط بوجود آمد . TDM به این صورت است که در آن هر بازه از زمان انتقال به قطعات کوچک تقسیم شده و هر کدام از این قطعات به انتقال داده ای مربوط به یکی از خطوط اختصاص می پردازد . این روش به صورت شماتیک در شکل نشان داده شده است :



برای استفاده از TDM بایستی سیگنال ها را با استفاده از ادوات الکترونیکی مالتی پلکس کرد و این امر ما را دچار محدودیت سرعت کلاک در مدارهای الکترونیکی خواهد نمود. در حال حاضر سرعت کلاک های 10Gbps و 40Gbps ، سرعت های دست یافتنی در ادوات الکترونیکی هستند که این دومی گران بوده و دارای محدودیت های زیادی نیز می باشد . بنابر این در یک ظرفیت انتقال پایین محدود خواهیم شد که به هیچ وجه در اندازه های توانایی انتقال بالای یک فیبر نوری نیست ! به این ترتیب سرعت های انتقال بالاتر از این ، یعنی 160 Gbps و بیشتر از عهده ی TDM خارج است .

در سیستم های انتقال سیمی و رادیویی ، یکی از روش های مالتی پلکس کردن که بسیار مورد استفاده است ، روش FDM (Frequency Division Multiplexing) است. در این روش پهنای باند فرکانسی خط انتقال به چندین بازه تقسیم شده و در هر کدام از این بازه ها یکی از سیگنال ها قرار داده می شود . این روش به شکل ساده ای در شکل زیر نمایش داده شده است .

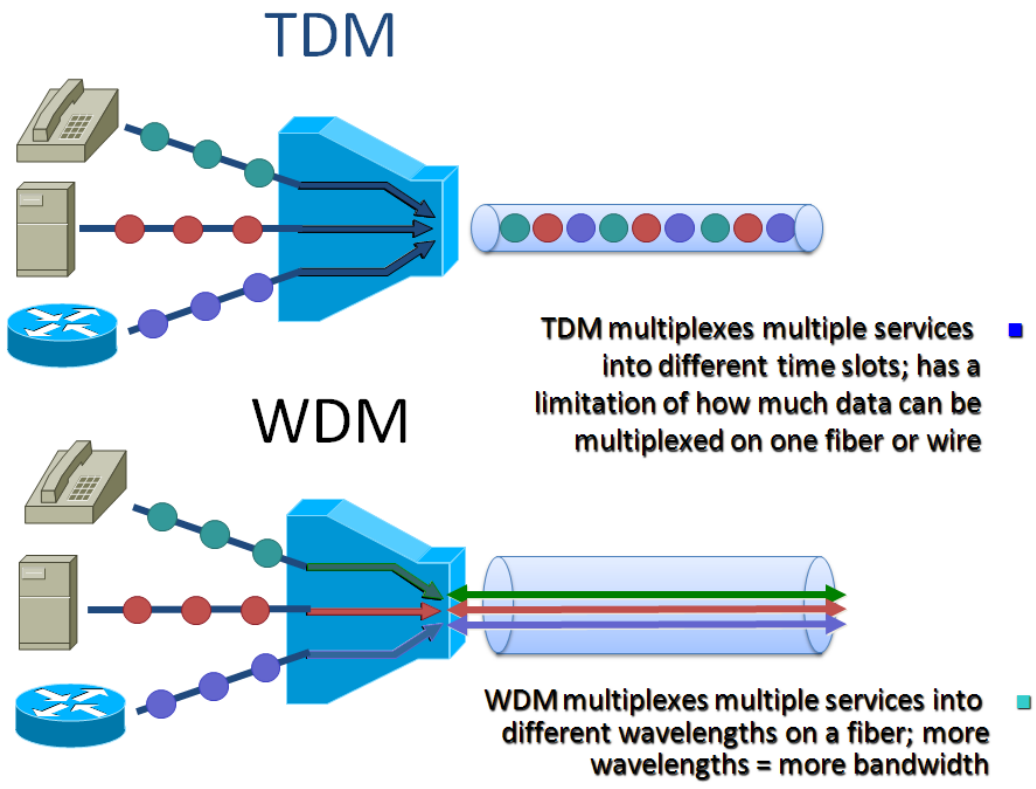


اما از آنجاییکه در مهندسی فیبر نوری در حوزه فرکانس بیشتر از اصطلاح طول موج به جای فرکانس بهره گرفته می شود ، بنابراین به مالتی پلکس حوزه فرکانس ، مالتی پلکس طول موج (Wavelength Multiplexing) می گویند.

با گسترش روزافزون تقاضا برای پهنای باندهای بیشتر ، برخلاف انتظار، این سیستم نیز قادر به برآوردن این نیاز نشد . طبعاً ساده‌ترین راهی که برای حل این مشکل به نظر می‌رسید ، خواباندن فیبرهای بیشتر درون خاک بود . این روش غیر از اینکه هزینه‌های هنگفتی را برای گسترش شبکه اعمال می‌کرد ، هیچ ضمانتی را برای برطرف کردن نیاز در سال‌های آینده نمی‌داد .

در واقع، این مشکل به دلیل محدودیت تکنولوژی بروز کرده بود و طبعاً با گذشت زمان حالت حادتر به خود می‌گرفت ؛ تا اینکه ایدهٔ استفاده از چند طول موج در یک فیبر (WDM) به عنوان راه‌حلی بلندمدت برای این مشکل مطرح شد.

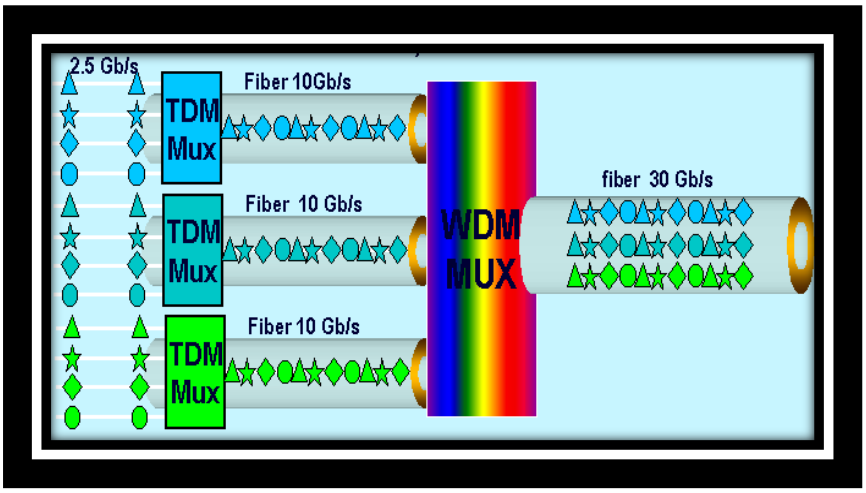
البته این ایده در روزهای آغازین استفاده از فیبر نوری برای انتقال اطلاعات مطرح شده بود، ولی در آن زمان محدودیت تکنولوژی امکان استفادهٔ عملی از آن را نمی‌داد . کلید حل این مشکل در استفاده از تقویت‌کننده‌های نوری بود که عملیات تقویت سیگنال نوری را بدون تبدیل آن به سیگنال الکتریکی انجام می‌دهند . به مرور زمان ، استفاده از حداکثر تعداد طول موج ها در سیستم (DWDM) مد نظر قرار گرفت . امروزه نیز با استفاده از این تکنولوژی، امکان ارسال 160 طول موج در یک فیبر که هریک نرخ ارسال اطلاعات 40 گیگابیت بر ثانیه دارند ، ممکن شده است . غیر از افزایش پهنای باند در سیستم DWDM ، هزینهٔ تجهیزات برای افزایش پهنای باند بسیار کمتر از سیستم SDH است .



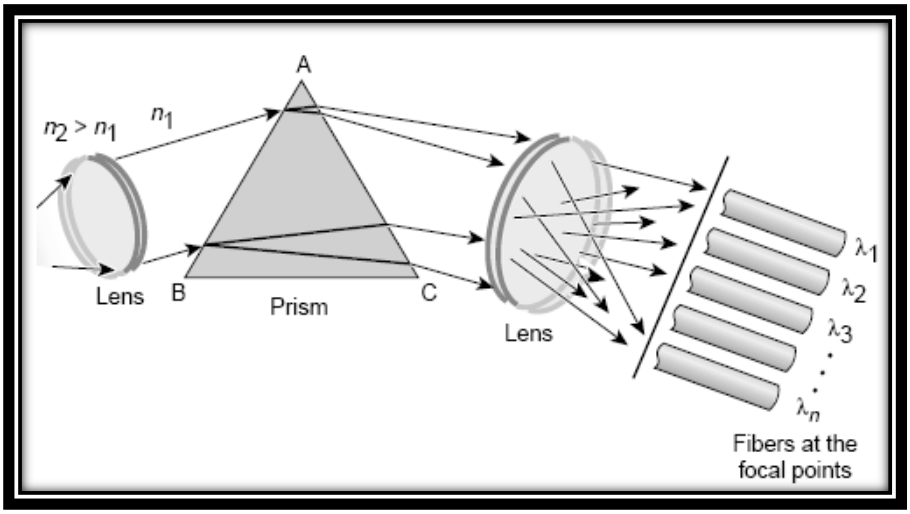
WDM (Wave Length Division Multiplexing) سیستمی است که روی یک تار نوری امکان ارسال و دریافت چند طول موج وجود دارد . این سیستم می تواند کانال ها یا طول موج ها را با فاصله 100Ghz یا 0.8nm از هم جدا کند و آنها را در یک تار بفرستد .

DWDM (Dense Wave Length Division Multiplexing) در واقع نوعی WDM می‌باشد ولی فاصله طول موج ها خیلی کمتر می‌باشد و در نتیجه تعداد زیادی طول موج را می توان بطور همزمان انتقال داد . این سیستم می تواند کانال ها یا طول موج ها را با فاصله 50Ghz یا 0.4nm از هم جدا کند و آنها را در یک تار بفرستد .

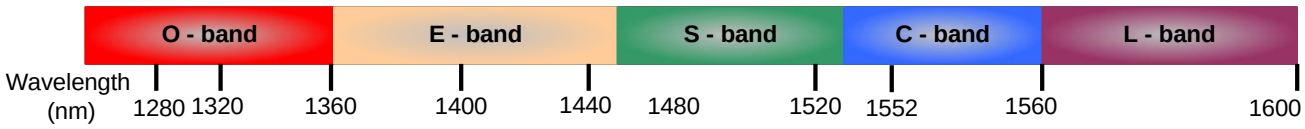
شکل زیر تلفیق دو سیستم TDM و WDM را نشان می دهد .



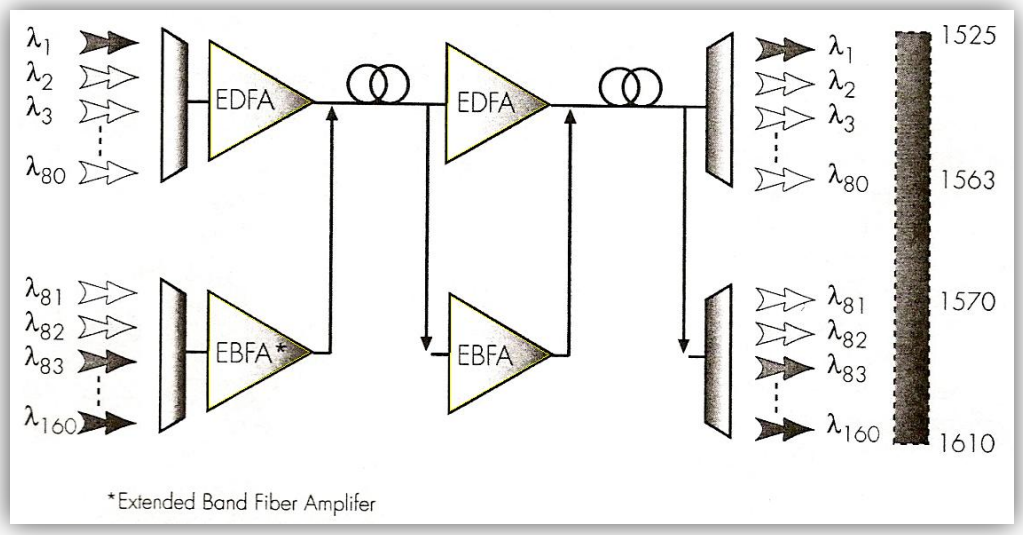
یک شکل ساده از سیستم مالتی پلکس می تواند یک منشور باشد . اگر یک پرتو متشکل از چندین طول موج مختلف را به یک منشور ، آنچنان که در شکل 8 نشان داده شده است بتابانیم ، بر اساس پدیده رنگین کمان ، هر کدام از طول موج ها (رنگ ها) ، با یک زاویه ی خاص شکسته شده و بنابر این در خروجی منشور با یک زاویه ی متفاوت از سایر رنگ ها خارج خواهد شد . سپس می توان یا استفاده از یک لنز ، این پرتو ها را بر روی فیبر های مربوطه متمرکز کرد .



بعلت آنکه در حال حاضر محدوده مناسب تقویت محدود میباشد تمامی طول موجهای حامل مورد استفاده درسیستم های DWDM در پنجره نوری سوم بین 1530 nm تا 1565 nm و همینطور پنجره جدید 1570nm تا 1610nm قرار دارند . ولی کانالهای سوپروایزوری نوری در طول موجهای خارج از این محدوده تقویت و در 1480 nm تا 1510 nm واقع هستند .



سیستم های DWDM رنج فرکانسی 1525 تا 1563 را به 80 کانال تقسیم می کند و اخیرا رنج فرکانسی 1570 تا 1610 را نیز با همان تعداد 80 کانال اضافه کرده اند .



از آنجا که اساس کار سیستمهای dwdm با تقویت کننده های نوری می باشد و همانطور که گفته شد این تقویت کننده مانند پمپ عمل کرده و فقط توانایی تقویت دامنه موج را دارد و قادر به از بین بردن پاشیدگی و یا اثرات غیر خطی ایجاد شده در طی مسیر نیست ، بنابراین نقش پاشندگی در ظرفیت انتقال بسیار برجسته می شود .

برای از بین بردن پاشیدگی کروماتیک می توان از تارهای با پاشندگی بسیار بالا و یا از Bragg grating (همانطور که گفته شد) استفاده کرد .

ظرفیت های انتقال در این سیستمها دائما در حال بهبود می باشد . به عنوان مثال یک ظرفیت عملی که توسط شرکت کورنینگ با استفاده از تار های LEAF ارائه سده است در زیر می بینید :

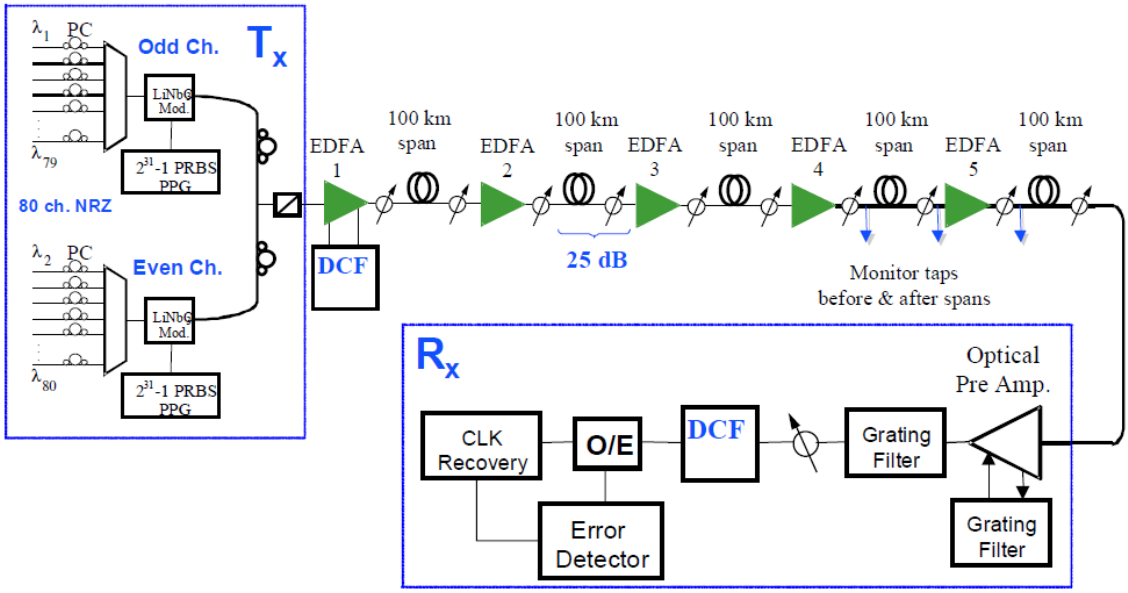
96کانال * 2.5 Gbit/s= 240 Gbit/s و یا

40کانال * 10 Gbit/s= 400 Gbit/s

و حتی این شرکت راه حل هایی برای رسیدن به سرعت های انتقال در حدود 800 Gbit/s

(80x10 Gbit/s) با استفاده از تار های LEAF بر روی تنها یک تار و مقدار فاصله مجاز 500 km

بدون استفاده از ریپیتر ارائه کرده است ! ، برخی از جزئیات این طرح را در زیر می بینید :



Experimental setup. PC = polarization controller, PPG = pulse pattern generator, VOA = variable optical attenuator.

۱۱ - تارهای LWP و ZWP :

Low Water Peak Single Mode Optical Fiber (LWP- SMF)

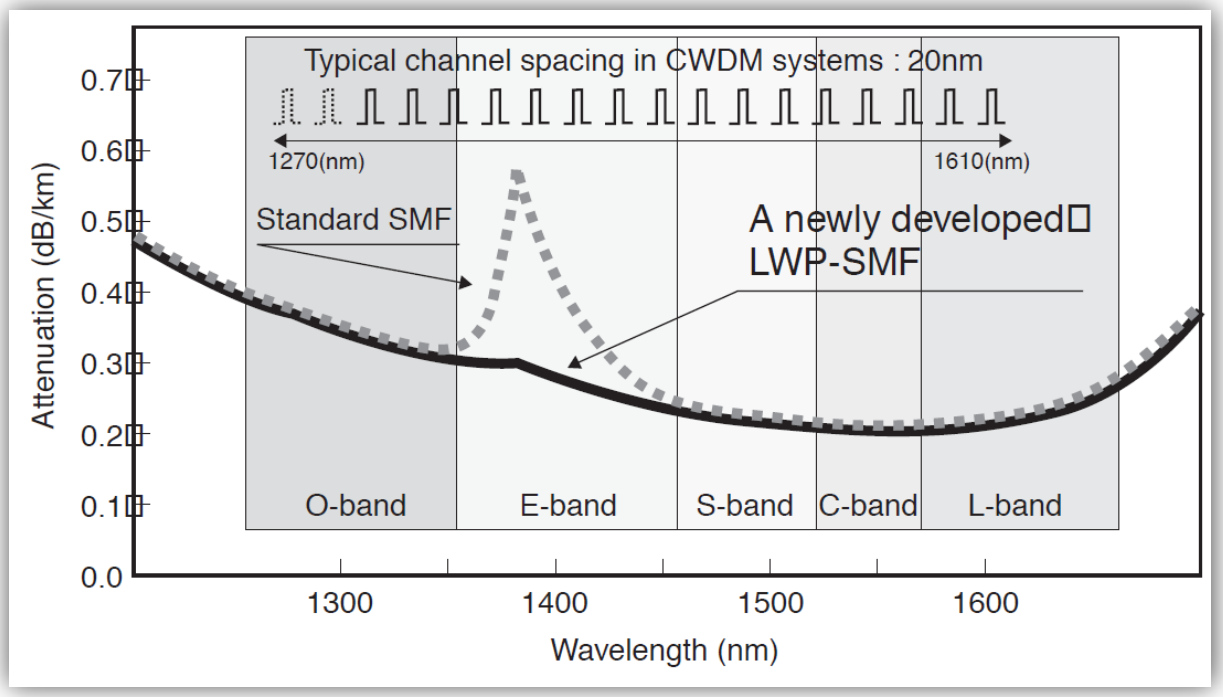
Zero Water Peak Single Mode Optical Fiber (ZWP- SMF)

تحت استاندارد ITU-T G.652 c , d

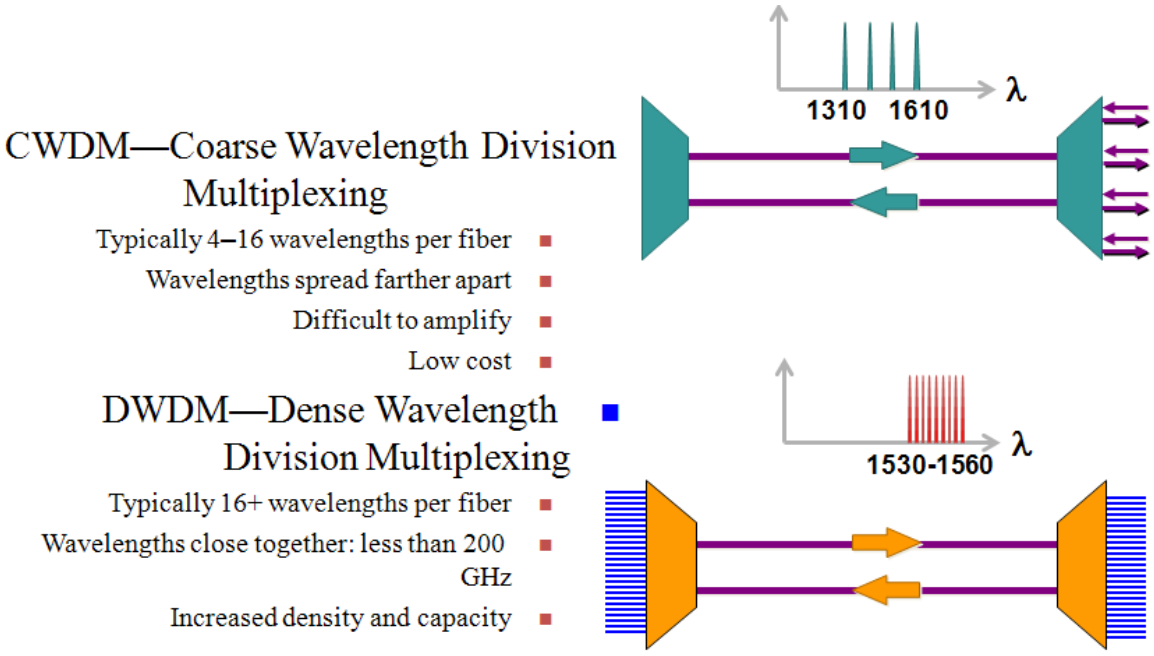
با افزایس تقاضا برای استفاده از شبکه های تار نوری ومعرفی سیستم های تسهیم طول موج به نام WDM و DWDM ، CWDM که طیف وسیعی از طول موج ها را شامل میشوند ، نقاط با افت حد اکثر به خاطر تاثیرات جذب یون OH^- مشکلاتی را برای این سیستم بهمراه داشت .

طول موج 1383 نانومتر دارای حد اکثر افت است بنا براین دانشمندان تصمیم به حذف بخار آب گرفتند تا بتوان از تمام باندهای یک تار نوری که اساس سیستم های CWDM

(Coarse Wave Length Division Multiplexing) نیز است استفاده شود . در این صورت می توان از تمام باند این سیستم که از 1270 تا 1610 نانومتر می باشد استفاده کرد . این سیستم می‌تواند حداکثر 18 طول موج مختلف را با فاصله های 20nm ارسال و دریافت نماید. این سیستم تجارتی‌تر بوده و ارزانتر از دو سیستم ذکر شده در بالا می‌باشد .



این تار دارای تضعیف کمتر از 0.3 دسیبل بر کیلومتر در طول موج 1383 نانومتر می باشد که نسبت به قبل که در حدود 2 دسیبل بود بسیار کاهش پیدا کرده است .



سیستم های DWDM برای کاربردهای راه دور طراحی و بهینه شده است ولی سیستم های CWDM برای کاربردهای داخل شهری با ظرفیت بالا استفاده می شود .

در زیر جدولی برای مقایسه تمامی تارها آورده شده است :

نوع تضعیف / نوع تار	تضعیف در 1310 nm	تضعیف در 1383 nm	تضعیف در 1550 nm	تضعیف در 1625 nm	سطح مقطع موثر (A_{eff})	قطر میدان مد (MFD) @1550nm	پاشیدگی (CD)	ضریب غیر خطی	طول موج قطع	طول موج پاشیدگی صفر	رنج فرکانس قابل استفاده	سیستم سازگار	تلفات کانکتور	قطر هسته (core)	قطر غلاف (Cladding)	قطر پوشش (Coating)
واحد	db/km	db/km	db/km	dB/km	μm^2	µm	ps/(nm.km)	10^{-9} [1/w]	nm	nm	nm		dB	µm	µm	µm
SSMF (S.M)	A ≤ 0.35	A>0.6	A ≤ 0.21	A ≤ 0.23	80	9.6 - 11.2	1550 D ≤ 18 1310 D ≤ 3.5	0.27	λ ≤ 1260	1300-1324	1310 & 1550	TDM	0.25	8.3	125 ± 1	250 ± 10
LWPF	A ≤ 0.35	A ≤ 0.31	A ≤ 0.21	A ≤ 0.23	80	9.6 - 11.2	1550 D ≤ 18 1310 D ≤ 3.5	0.27	λ ≤ 1260	1300-1324	1270 - 1610	CWDM & TDM	0.25	8.3	125 ± 1	250 ± 10
DSF	–	–	A ≤ 0.23		50	7.4 - 9	|D| ≤ 2.7	0.47	λ ≤ 1260	1550	1550	TDM		8.3	125 ± 1	250 ± 10
LS	–	–	A ≤ 0.23		55		0 > D ≥ -3.5	0.42	λ ≥ 1550		1550	DWDM	0.34	8.3	125 ± 1	250 ± 10
NZDSF	–	–	A ≤ 0.23	A ≤ 0.25	65	7.8 – 9 9.2 - 10	1530 - 1565 2.0 - 6.0 1565 - 1625 4.5 - 11.2		λ ≤ 1480	λ ≤ 1503	1525 - 1565	DWDM	0.34	8.3	125 ± 1	250 ± 10
LEAF	–	A ≤ 0.4	A ≤ 0.22	A ≤ 0.25	72	9.2 - 10	1530 - 1565 2.0 - 6.0 1565 - 1625 4.5 - 11.2	0.32	λ ≤ 1450		1525 - 1610	DWDM	0.29	8.3	125 ± 1	250 ± 10
Ultra LEAF	–	–	A ≤ 0.23	A ≤ 0.26	95	9.1 – 9.9	1460-1625 4.0 -15.0		λ ≤ 1450		1525 - 1610	DWDM		8.3	125 ± 1	250 ± 10