



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

دانشگاه لیزر

تکنیک‌های ساخت پیشرفته اجزا فیبر نوری

خلاصه

با استفاده از فن‌آوری‌های جدید در فرآیند فیبر نوری، امکان بهره‌مند شدن از منفعت‌های فرآیندهایی همچون تکنیک‌های لنز کردن فیبر نوری، فن‌آوری cap انتهایی فیبر نوری، نوک تیز ساختن فیبر (tapers)، خروجی‌های (Fan-outs) فیبر نوری چند هسته‌ای (multicore)، ترکیب کننده‌های فیبر، انطباق دهنده‌های میدان مد و اضافه کردن غلاف (overcladding) بیشتر شده است.

کلمات کلیدی: کلاهک انتها، انتهای نازک شده، چند هسته‌ای، اضافه کردن غلاف، کندیدن، آکسیکون، ترکیب کننده، اتصال دادن، هزینه-تولید، فضای آزاد، گداختن، جرم حرارتی، موج میرا، فاجعه بار، به صورت معکوس نازک شده، آدیاباتیکی.

مقدمه

پیشرفت‌های پی‌درپی در فن‌آوری‌های فراوری فیبر نوری و ورود حوزه‌های جدید تحقیقاتی به حوزه تخصصی فیبرهای نوری، موجب به وجود آمدن نسل جدیدی از عناصر مربوط به فیبر نوری شدند. با ورود پلتفرم‌های فراوری بسیار بسیار دقیق شیشه، حوزه ساخت اجزا فیبرنوری از آزمایشگاه‌های مستقل آکادمیک به سمت استفاده در ماشین‌های تجاری در دسترس، با قابلیت خاص یا قابلیت عمومی حرکت کرده است. امروزه ماشین‌هایی با کارکرد خاص در دسترس هستند که می‌توانند برای هدف منحصر به فرد ایجاد لنز تویی شکل به کار گرفته شوند یا با استفاده از لیزر دی‌اکسید کربن (CO_2) با فرآیند کندگی (ablate) لنز مخروطی (axicon) (لنز با شکل مخروطی) را بسازند. به علاوه دستگاههایی که قابلیت چند نوع کار مانند اتصال (splice) فیبرهای مشابه و غیر مشابه را دارا هستند به صورت ماشین‌های عمومی توسعه داده شده‌اند که از جمله شکل دهی لنز، نازک کردن انتهای فیبر و آماده کردن اجزا فرآیندهایی که تا به حال به طور عمومی دیده شده‌اند را انجام می‌دهند.

باید خاطر نشان کرد که بدون توسعه این حوزه جدید، قابلیت ساخت این عناصر در تولید انبوه می‌تواند همچنان موجب مشکلات فنی شود. اگرچه تعداد زیادی اجزا در این حوزه کاری وجود دارد، این متن تنها به گستره زیر



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

د انستنیها ی لیزر

محدود شده است: تکنیک لنز کردن فیبر، فن آوری کلاهی کردن انتها، نازک کردن سر فیبر، خروجی فیبر چند هسته‌ای، ترکیب کننده‌های (Combiner) فیبر، تطابق دهنده‌های میدان مد و اضافه کردن (Overcladding).

فن آوری‌های لنز کردن

امروزه به کمک فن آوری، قادر به انجام هر گونه شکل‌دهی لنز بر روی فیبر نوری هستیم. برای مثال از لحاظ کاربردی: لنزهای آکسیکون را برای افزایش بازدهی تزویج لیزرها و LED ها به داخل فیبر در اندازه چپ (chip) به کار می‌برند درحالیکه لنزهای تویی در حوزه پزشکی به منظور آشکار کردن سرطان و نابود کردن سنگ کلیه استفاده می‌شوند. به طور نوعی لنزهای آکسیکون هم با فرآیند خاصی از پولیش سر فیبر تولید می‌شوند و هم با لیزر CO₂ به کمک کندی (obliterate) انتهای فیبر (به طوری که با حذف ماده غلاف (cladding) سر فیبر مخروطی می‌شود)، انجام داده می‌شود (شکل ۱).

Spec	Polished sample	Tapered axicon
Ellipticity: < 1.2	Ellipticity = 1.03 	Ellipticity = 1.02
Beam shape: Near Gaussian		
Spot size: 2.5 μm ±10%	2.37 μm	2.41 μm

شکل ۱: اکسیکون پولیش داده شده (ستون وسط جدول) و اکسیکون نازک شده (سمت راست) به همراه بیضوی بودن باریکه و شکل جبهه موج باریکه نشان داده شده‌اند. (با اجازه از Oz Optics؛ اکسیکون نازک شده با اجازه از AFL)

ساخت میکرو لنز باعث تغییر خواص انتهای فیبر نوری می‌شود و به جای ماده غلاف، هسته در معرض هوا قرار می‌گیرد. اختلاف ضریب شکست هوا و شیشه به طور اساسی با اختلاف شکست هسته و غلاف فرق می‌کند. به علاوه شکل مخروطی باعث بوجود آمدن اثر لنز در انتهای فیبر نوری شده که به نوبه خود موجب جمع آوری بیشتر نور LED یا لیزر دیود به داخل فیبر نوری می‌شود.



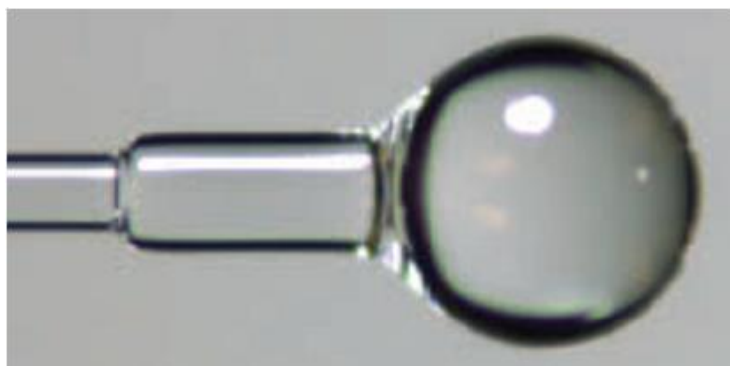
مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

د انستنیها ی لیزر

در حالیکه فرآیند پولیش به کار گرفته شده برای تولید آکسیکون در انتهای فیبر نوری بسیار موثر است با این حال بسیار تحت تأثیر نحوه کار کاربر است. فیبر نوری باید تحت زاویه بسیار دقیق نگه داشته شود و زمانی که مقادیر زیادی ماده غلاف از روی فیبر برداشته می شود تحت پولیش قرار گیرد. در مقابل لنزهای آکسیکون تولیدی توسط فرآیند کندگی در سیستم های بسیار اتوماتیک تولید می شوند که زمان بار گذاری و برداشتن فیبر نوری در آن از زمان لازم برای ایجاد لنز طولانی تر است. هر دوی این لنزهای آکسیکون تولید شده دارای ظاهر و اجزا اجرایی (performing components)، بسیار مشابه هستند.

لنزهای آکسیکون نازک بر خلاف دو مورد بالا، با گرما دادن و کشیدن فیبر نوری تا لحظه ای که ناگهان نوک (tip) فیبر ایجاد شود، تولید می شوند. اگرچه شکل مخروطی لنز دارای زاویه ای است که بسیار از لحاظ زاویه شیب کم است ولی به طور نسبتاً دقیق عملکرد نوری مانند دو تکنیک بالا دارد. بر خلاف روش های دیگر که اندازه هسته بدون تغییر می ماند، اختلاف نوعی این طراحی آن است که هم زمان با کشیده شدن غلاف، هسته نیز کشیده می شود. نظر به این که نور در نوک فیبر از طریق محل تماس هوا-غلاف هدایت می شود به هر حال کاهش قطر هسته اثری بر روی کیفیت باریکه ندارد. این تکنیک از آنجا که به طور نوعی بر روی هر متصل کننده (splicer) ویژه موجود در بازار کنونی قابل اجرا است قابلیت انجام مقرون به صرفه است.

لنزهای توپی (ball) که در شکل ۲ مشاهده می شود با چندین روش قابل تولید است. از این لنز بیشتر در اتصال (splice) مرسوم در فیبر بدون هسته که بر روی فیبر خروجی قرار گرفته است و سپس لنز توپی در فاصله ای ثابت (معین) از انتهای فیبر (خروجی) نصب شده، به کار گرفته می شود.



شکل ۲: لنز توپی انتهای یک فیبر نوری، خروجی را موازی، کانونی یا زاویه واگرایی را کاهش می دهد (با اجازه از AFL).



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

د انستنیها ی لیزر

به دلیل اینکه فیبرهای فاقد هسته موجب یکنواختی ضریب شکست کلی شده و باریکه‌ای غیراغتشاشی تولید می‌کند، ترجیح داده می‌شوند. اگر فیبرهای فاقد هسته استفاده نشوند در نتیجه آن مواد ضریب شکست غلاف و هسته با هم آمیخته شده، موجب کیفیت ضعیف و ناسازگاری باریکه خروجی می‌شود.

اندازه لنز توپی و فاصله آن از نقطه‌ای که باریکه شروع به واگرایی به داخل فیبر بدون هسته می‌کند می‌تواند طوری سر هم بندی شود که خروجی باریکه از لنز توپی به صورت همگرا، واگرا یا موازی شود. تکنیک‌های فرآوری اساسی می‌توانند روی لنز توپی انجام شوند مانند لایه نشانی پوشش‌های ضد بازتابی (antireflection (AR)) و یا پولیش کردن سطح تخت بازتابی، تا باریکه‌ای خارج شده از سمت خروجی را ایجاد کند. لنزهای توپی می‌توانند در مسیر باریکه‌ای باز شده‌ی کانکتورها به منظور کاهش اتلاف، نصب شوند تا اجازه افزودن قطعات اپتیکی خارجی به داخل مسیر باریکه را بدهد.

به خاطر سادگی تولید لنزهای توپی، ساخت آن توسط اسپلایس‌های فیوژنی ویژه یا ماشین‌هایی که با هدف خاص ساخت لنز توپی طراحی شدند، امکان‌پذیر است. خوشبختانه تولید لنز توپی بواسطه فیزیک کشش سطحی شیشه مذاب به راحتی انجام می‌شود. هم زمان با حرارت دادن فیبر و وارد کردن سر آن به داخل منبع حرارتی به طور طبیعی شیشه ذوب شده و به خاطر کشیده شدن سطح به واسطه کشش سطحی شکل کروی تشکیل می‌شود.

فن‌آوری کلاhek انتها

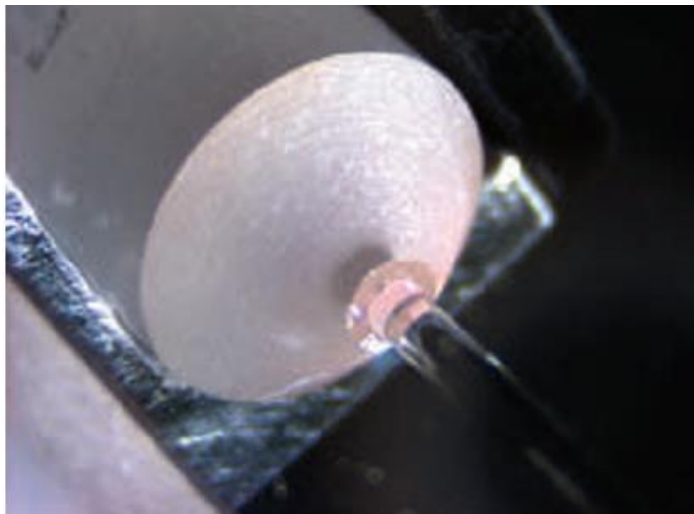
ورود لیزرهای فیبری توان بالا طی چند سال اخیر موجب پیشرفت فن‌آوری کلاhek انتها شده است. چگالی انرژی در خروجی انتهای لیزر فیبر می‌تواند بسیار زیاد باشد اما با استفاده از کلاhek انتهایی این چگالی زیاد انرژی می‌تواند با روش قابل کنترل، واگرا (diverge) شود. لیزر خروجی از کلاhek انتهایی می‌تواند دوباره بر روی سطح کاری با استفاده از قطعات اپتیکی فضای آزاد (free-space) متمرکز (focus) شود.

بزرگی نامحدود قطر کلاhek انتهایی نسبت به قطر فیبر نوری می‌تواند به عنوان یک چالش مطرح باشد ولی مرسوم نیست که این قطر بزرگتر از ۴ تا ۸ برابر قطر واقعی انتهای لیزر فیبر باشد (شکل ۳ را ببینید).



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

د انستنیها ی لیزر



شکل ۳: کلاهک انتهایی (چپ بالا) به فیبر (راست پایین) اسپلایس شده است. (با اجازه AFL)

اندازه بزرگ کلاهک انتهایی برای بعضی از روش‌های حرارت دادن می‌تواند به عنوان یک چالش باشد که در عمل فیبر با استفاده از گداختن (fuse) به کلاهک انتهایی متصل می‌شود.

زمانی که از اسپلایس‌های قوس الکتریکی و فیوژن فیلامنتی استفاده می‌شود باید بسیار مراقب بود تا توزیع حرارتی فیبر شیشه‌ای با اندازه بسیار کوچک در مقابل کلاهک انتهایی خیلی بزرگ، مدیریت شود. انرژی لازم دریافت شده توسط کلاهک انتهایی برای رسیدن به فاز ذوب، به طور نوعی موجب بخار شدن فیبر نوری با قطر کم می‌شود. برای جبران این حالت می‌توان کلاهک انتهایی را از قبل وارد منبع حرارتی کرد.

حین استفاده از لیزر CO_2 به منظور حرارت دادن، مسایل زیر رعایت می‌شود. در این حالت لیزر CO_2 به خاطر جذب فوتون‌ها توسط سیلیکا (silica) دارای کارایی است که اثر آن متناسب با مساحت سطح (surface area) و جرم حرارتی (thermal mass) شئی تحت تابش لیزر است. کلاهک انتها نسبت به فیبر کوچک‌تری که به آن متصل است دارای جرم حرارتی و مساحت سطح زیادی‌تری است، بنابراین وقتی این دو فیبر در معرض انرژی لیزر CO_2 قرار می‌گیرند به طور تقریبی با نرخ یکسان حرارت دریافت می‌کنند. تمامی این روش‌های حرارت دهی از آنجا شروع می‌شود که ارسال نور از کلاهک انتهایی بدلیل جرم بزرگتر آن موجب کاهش اثر هیت سینک می‌شود.



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

دانشگاه لیزر

انتهای نوک تیز (tapers)

نازک کردن انتهای فیبر دارای چندین کاربرد است، برای مثال: تطبیق میدان مد برای کمینه کردن اتلاف در اسپلایس؛ کمباینر برای افزایش توان به داخل فیبر و ایجاد سنسورهای فیبری موج-میرا (evanescent-wave) موج‌هایی مانند: موج‌های بازتاب داخلی که به سرعت با طی مسافتی تقلیل می‌یابند که اندرکنش مواد خارجی با موج میرا که در اطراف فیبر نوری شدت نازک شده با قطر بسیار کم وجود دارد را آشکار می‌سازند. نازک کردن آدیاباتیک (بی‌درو) فیبر، اطمینان از باقی‌ماندن نور محصور شده در داخل هسته-غلاف یا غلاف را تضمین می‌کند.

با توجه به تجهیزات موجود امکان دستیابی به نازک سازی فیبر با نسبت ۱۰ به یک، در یک بار عبور از دو سکوی انتقالی که فیبر را در همان جهت نگه می‌دارد، وجود دارد. یکی از مشخصه‌های مهم هم برای دستگاه عمومی در دسترس یا ماشین‌های نازک کاری ویژه در بازار، جابجایی خطی سکوی‌های نگه دارنده فیبر است. در بعضی از نازک کاری‌های فیبر لازم است سکو تا ۱۵۰mm حرکت کند تا عمل نازک کاری انجام شود. لذا زمانی که تجهیزات نازک کاری فیبر را انتخاب می‌کنیم باید مطمئن شویم که حرکت سکو کافی بوده تا الزامات قطعه تولید شده برآورده شود.

خروجی فیبر چند هسته‌ای

پیشرفت‌های اخیر فیبرهای چند هسته‌ای (multicore fibers (MCFs)) در صنعت فیبر، برای استفاده در کاربرد سنسور و برای افزودن قابلیت افزایش چگالی ارسال اطلاعات از یک فیبر منفرد، برای کاربرد در مسافت‌های طولانی مفید بوده است. یکی از چالش‌های این فیبرها ارسال و دریافت سیگنال از تک تک هسته‌های آنها است. خروجی‌های MCF این قابلیت را ایجاد می‌کنند که بر این مسئله فائق آییم. خروجی فیبر چند هسته‌ای شامل یک دسته فیبرهای انطباق یافته است که شامل چندین هسته‌ای می‌شوند که با هسته‌های فیبر چند هسته‌ای انطباق دارند. نازک کردن این فیبرها تا زمانی که فاصله هسته‌های آنها با فضای هسته‌های فیبر چند هسته‌ای تطابق پیدا نکند، ادامه دارد. سپس این ساختار کمپوزیتی برش خورده و به انتهای فیبر چند هسته‌ای اسپلایس می‌شود، بنابراین با این روش تک تک هسته‌ها در دو انتهای ورودی و خروجی MCF به هم دسترسی خواهند داشت.



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

د انستنیها

ی لیزر

مسئله حساس برای تولید قطعات همراستاسازی هسته آن است که این بر قراری همراستاسازی بایستی در مقیاس زیر میکرون باشد. با توجه به این قابلیت عالی، ایجاد حرارت بسیار یکنواخت و فرآیند نازک کاری آدیاباتیک و فضای بین هسته یکنواخت، الزامی است.

ترکیب کننده های فیبر

به طور عمومی ترکیب کننده های فیبر برای فراهم کردن انرژی پمپ لیزر دیود برای لیزرهای فیبر استفاده می شوند. با نازک کردن چندین فیبر با هم دیگر، انرژی دیودها می تواند به داخل یک فیبر تکی وارد و به فیبر فعال (active) برای ایجاد کاواک لیزر، اسپلایس کرد. چندین روش متنوع برای طراحی ترکیب کننده وجود دارد که هر کدام از آنها دارای هدفی یکسان هستند که عبارت است از ارسال بیشترین مقدار نور به داخل کاواک لیزر با کمترین اتلاف.

تجهیزاتی که بتوانند ترکیب کننده فیبر تکرارپذیر و قابل اطمینان تهیه کنند در دسترس هستند. در تولید این ترکیب کننده ها باید بیشترین مراقبت در نظر گرفته شود، به طوری که شخص مطمئن باشد که طراحی آدیاباتیک و خالی از هر گونه آلودگی به انجام برسد زیرا انرژی ارسالی از طریق این فیبرهای ترکیب شده بشدت به هردو مورد حساس است. اتلاف متمرکز شده به طور محلی به مقدار زیاد می تواند باعث فاجعه (catastrophic) در لیزر فیبر شود، اگر انرژی آزاد شده در فیبر از محل پمپ ترکیب کننده به دلیل آدیاباتیک نبودن یا وجود آلودگی زیاد باشد می تواند باعث داغ شدن بی نهایت زیاد محل اتصال شود. این نوع نقص ها قابل برگشت نبوده و الزام می دارد که کل سرهم بندی لیزر فیبر تعویض و دوباره کاری شود.

انطباق گرهای میدان مد

انطباق گرهای میدان مد خواص اپتیکی فیبر را تغییر داده تا با مد فیبر اسپلایس شده انطباق حاصل شود و در نتیجه آن اتلاف در نقطه اسپلایس به کمترین مقدار برسد. این مسئله به دو روش انجام می شود: (۱) هسته بزرگتر برای انطباق بیشتر با هسته کوچکتر تحت نازک کاری قرار می گیرد (۲) هسته کوچکتر می تواند بوسیله گرما دادن قبل یا حین اسپلایس، از لحاظ اندازه بزرگتر شود. در بیشتر حالات ذکر شده، اسپلایس فیبر تک مد به فیبر چند مدی، زمانی که از فیبر چند مدی به فیبر تک مدی گسیل انجام می شود به طور نوعی باعث اتلاف ۲۰dB می شود؛ با استفاده از MFAs (Mode-field adapters) امکان کاهش این اتلاف به کمتر ۱dB وجود دارد. امروزه بیشتر اسپلایس کننده ها دارای این قابلیت هستند.

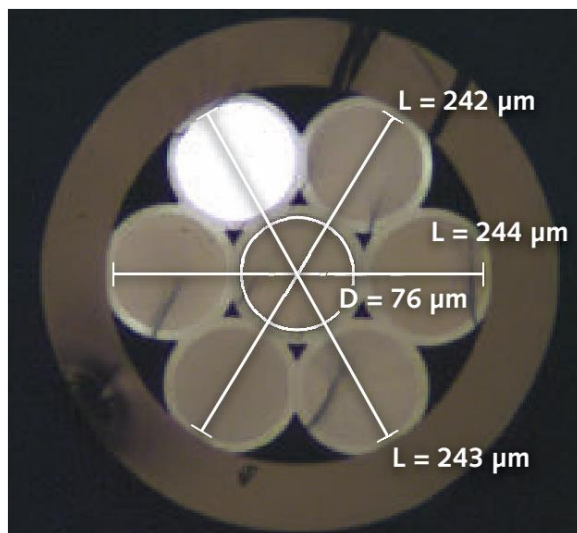


مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

دانشگاه لیزر

اضافه کردن غلاف (overcladding)

در فرآیند اضافه کردن غلاف، فیبر در داخل لوله موئین قرار داده می‌شود تا با گداختن لوله با فیبرهای داخل آن لوله جمع شده مجموعه یکپارچه شود. در شکل ۴، اضافه کردن غلاف برای ترکیب کننده فیبر مورد استفاده قرار گرفته شده است. از این فرآیند نیز برای ایجاد فضای آب بندی کامل مابین فیبر و لوله موئین می‌تواند به کار گرفته شود.



شکل ۴: ترکیب کننده چند فیبری که توسط لوله موئین نگه داشته شدند (با اجازه از AFL).

یکی از کاربردهای جالب استفاده از اضافه کردن غلاف، به هم پیوستن آن با یک فیبر به طور معکوس نازک شده است. یک راه ممکن برای افزایش روزنه عددی هسته یک فیبر در مسافت کوتاه، استفاده از نازک کردن به صورت معکوس است به این صورت که پس از ایجاد قسمت نازک شده به طور معکوس، فیبر در بخش بزرگتر شده، برش داده می‌شود. سپس بخش بزرگتر شده فیبر در داخل لوله موئین قرار داده شده و با گداختن، آن را جمع می‌کنیم تا بخش آب بندی کامل ایجاد شود. بنابراین در این حالت انرژی بالایی می‌تواند به داخل هسته با قطر بزرگتر که ایجاد شده، ارسال شود. در بخش نازک شده، قطر هسته به طور آدیاباتیکی به اندازه عادی‌اش کاهش داده می‌شود تا مانع از اتلاف انرژی قابل توجهی شود.



مرکز ملی علوم و فنون
لیزر ایران

دانشنامه لیزر

نتیجه گیری

طی ۳۰ سال بسیاری از کمپانی‌ها در صنعت فیبر نوری اجزا مجزای خاص را ساخته‌اند؛ بیشتر آن کارها طبق سفارش، با تجهیزات اختصاصی انجام شده‌اند. در نتیجه‌ی پیشرفت‌های کنونی در اتصال دهی و تجهیزات فرآیند شیشه شاهد پیشرفت‌های متعددی در قابلیت‌های اجزا فیبر نوری هستیم. تجهیزات بسیار دقیق ساخت تا حد بسیار بسیار پیچیده در اجزا فیبر نوری راحتی کار را به ارمغان آورده که به نوآوری در صنعت کمک شایانی خواهد کرد.

مرجع‌ها

- [1] "Laser Focus World", January 2015, Vol. 51, No. 1
- [2] "Encyclopedia Britannica Ultimate Reference Suite" Ver. 2015