

ساخت فیبر نوری باریک شده آدیاباتیک به منظور برانگیزش مدهای رزونانسی میکروکواکها

زینب چناری^۱, حمید لطیفی^{۱,۲} و فاطمه درودمند^۲

^۱تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسمای، ^۲تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک

چکیده- این مقاله به بررسی و تحلیل ساخت یک فیبر نوری باریک شده با استفاده از یک قطره اسید می پردازد. به منظور کنترل دقیق فرایند، روشی دو مرحله ای (با استفاده از اسید HF ۴۸٪ و بافر) پیشنهاد شده است که منتج به فیبرهای باریک با اتلاف پایین می شود. فرایند توسط تحلیل طیف و سیستم میکروسکوپی پایش می شود. فیبرهای باریک با اتلاف کمتر از ۰.۴ dB در هوا و ۴.۵ dB در آب نشان داده شده اند. از یک فیبر باریک ساخته شده به این روش برای برانگیزش موثر مدهای رزونانس سطحی یک میکروکره استفاده شده است.

کلید واژه- فیبرنوری باریک آدیاباتیک، خوردگی شیمیایی، مدهای رزونانس سطحی

Adiabatic Tapered Optical Fiber Fabrication for Exciting Whispering Gallery Modes in Microcavities

Z. Chenari,¹ H. Latifi,^{1,2} and F. Dorodmand²

¹ Laser & Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, 1983963113, Evin, Tehran, Iran ;² Department of Physics, Shahid Beheshti University, 1983963113, Evin, Tehran, Iran

Abstract- This article demonstrates an investigation and analysis of a tapered fiber fabrication using an etchant droplet method. To achieve precise control on process, a two-step etching method is proposed (using 48% concentration of HF acid and Buffered HF) which results in low-loss adiabatic tapered fiber. A spectrum analysis monitoring in addition to a microscopy system was used to verify the etching progress. Tapers with losses less than 0.4 dB in air and 4.5 dB in water are demonstrated. A biconical fiber taper fabricated using this method was used to excite the WGMs on a microsphere surface in aqua environment.

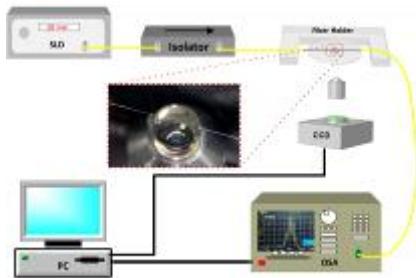
Keywords: Adiabatic tapered optical fiber, Chemical etching, whispering gallery mode

آن در حین ساخت بدست آورد.

۲- مواد و روش

۱- روش ساخت

برای ایجاد خوردنگی با اسید، باید بخشی از یک فیبرتک مدل-28SMF بدون روکش را که می‌خواهیم باریک شود در اسید قرار دهیم. هندسه نگهدارنده اسید تاثیر زیادی بر نرخ خوردنگی و شکل نهایی فیبر باریک خواهد داشت. شماتیک نگهدارنده طراحی شده در این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. برای انجام خوردنگی از دو قطعه استفاده شده است. قطعه اول نگهدارندهای به شکل U است که فیبر تک مد اولیه را به طور کاملاً کشیده و محکم نگه می‌دارد. قطعه دوم یک پتری دیش پلاستیکی است که نگهدارنده اسید است. خاصیت آبرگزیزی پتری دیش سبب می‌شود یک قطره روی سطحش شکل بگیرد. همچنانی پتری دیش شفاف است و بنابراین قطر کمر فیبر را می‌توان از زیر آن با استفاده از یک میکروسکوپ اندازه گیری کرد. شکل قطره برای حجم مشخصی اسید همواره ثابت باقی ماند درنتیجه آزمایش تکرارپذیری بسیار خوبی خواهد داشت. حجم اسید 11 ml بوده است و آزمایش‌ها در دمای $23 \pm 3^\circ\text{C}$ انجام شده است.



شکل ۱. طرح شماتیک چیدمان باریک سازی فیبر نوری

خوردنگی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول از اسید با غلظت بالاتر (۴۸٪) استفاده کردیم. اما بعد از خوردن شدن ۶:۱ بیش از ۸۰ درصد فیبر، از محلول بافر HF با نسبت حجمی ۶:۱ (۴0% wt NH_4F / 48% HF) استفاده کردیم. با کاهش غلظت اسید نرخ خوردنگی کاهش می‌یابد در نتیجه کنترل بیشتری بر زمان خوردنگی خواهیم داشت. بعد از رسیدن فیبر به قطر کمر دلخواه، برای متوقف کردن خوردنگی، اسید را با استفاده از پیپت خارج می‌کنیم. سپس با آب DI اسید باقیمانده از سطح فیبر شسته می‌شود. ساخت تیپر با این روش بارها انجام شده است و تکرار پذیری بسیار بالایی دارد.

۲-۲ پایش خوردنگی

۱- مقدمه

میکروروزناتورهای WGM در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی و تکنولوژی به خاطر حجم محدود بسیار کم و فاکتور کیفیت بسیار بالا توجه زیادی را به خود جلب کرده اند [1]. یکی از بهترین کاربردهای آنها استفاده به عنوان بیوسنسورهای بدون برچسب بوده است [2,3]. اما، جفت کردن نور به درون این کاواکها موضوعی چالش برانگیز است. در میان روش‌های متعددی که پیشنهاد شده است، فیبر نوری باریک شده آدیباتیک موسوم به تیپرهای آدیباتیک نشان داده که موثرترین روش برانگیزش مدهای WGM هستند [4]. تیپرهای آدیباتیک امکان خارج شدن توان اپتیکی از فیبر را فراهم می‌کنند در حالیکه از مزیت انتقال سیگنال با استفاده از فیبر نیز بهره مند هستند. پروفایل آدیباتیک این تیپرهای مد اصلی فیبر را در حین انتشار به مددی تیپر در ناحیه باریک شده تبدیل می‌کنند و بالعکس که سبب می‌شود کمترین جفت شدگی میان مدهای هسته و مغزی فیبر صورت گیرد. به علاوه لازم است سطح تیپرهای بسیار هموار باشد تا از اتلاف پراکندگی جلوگیری شود.

دو روش کلی برای ساخت تیپرهای آدیباتیک وجود دارد، روش گرم-کشش و روش خوردنگی با اسید. روش گرم-کشش روشی نسبتاً سریع است و تیپرهای با اتلاف بسیار پایین تولید می‌کنند. اما نیاز به استفاده و تنظیم پایه‌های موتوردار جهت کشش فیبر و یک منبع حرارتی مانند لیزر CO_2 روش میکروساریمیک هیتر و یا شعله دمای بالا دارند [5,6]. روش خوردنگی با اسید کمتر مورد توجه قرار گرفته است به دلیل اینکه نوعاً تیپرهای ساخته شده به این روش اتلاف بالایی دارند. از طرف دیگر این روش ساده است و با کمترین امکاناتی در هر آزمایشگاهی امکانپذیر است. اخیراً روشی با استفاده از اسید مبتنی بر جریان میکرو قطرات اسید بر روی فیبر ناشی از کشش سطحی، ارائه شده است که تیپرهای با اتلاف قابل مقایسه با روش گرم-کشش تولید می‌کند [7]. به علاوه، تیپرهای ساخته شده به این روش طول کوتاهتری دارند و بنابراین برای اهداف مجتمع سازی مناسب هستند. اما این روش کنترل خوبی بر اتمام فرایند خوردنگی ندارد.

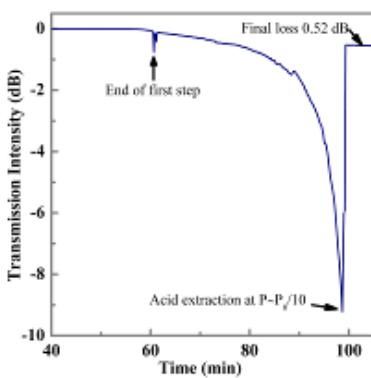
در این مقاله، نشان می‌دهیم چگونه می‌توان با افزودن یک مرحله خوردنگی به روش قطره اسید، تیپرهای آدیباتیک با قطر کمتر از طول موج با اتلاف کم تولید کرد. تیپرهای ساخته شده عبور بیش از ۹۰٪ دارند به خاطر انتقال بسیار بهینه مددی بخش باریک نشده به مدد اصلی بخش باریک شده. نشان داده ایم که ویژگیهای نهایی تیپر را می‌توان دقیقاً از طیف عبوری

^۱ Whispering gallery mode

با نرخ خوردگی حدود 160 nm/min . این نتیجه امکان کنترل کافی بر فرایند خوردگی را نشان می دهد.

۳-۳ تحلیل طیف عبوری

از آنجا که توان عبوری P_t فیبر وابسته است به تعداد مدهای برانگیخته شده در ناحیه باریک شده، پایان فرایند خوردگی با پایش P_t تعیین می شود. از اینرو ما نور یک منبع پهن باند $(1450\text{-}1650\text{nm})$ با پروفایل گاووسی را وارد فیبر می کنیم و طیف عبوری آنرا توسط یک تحلیلگر طیف نوری بررسی می کنیم. بدین ترتیب می توانیم کاهش P_t را در حین فرایند خوردگی اندازه گیری کنیم. شکل ۴ تغییرات پیک توان $(P_{t,\max})$ را با زمان نشان می دهد. در 50 دقیقه اول، تغییر محسوسی مشاهده نمی شود چون قطر فیبر بزرگتر از $10\text{ }\mu\text{m}$ است و بنابراین میدان میرا ضعیف است. با برداشتن غلاف، $(P_{t,\max})$ شروع به کاهش می کند. در این لحظه قطره اولیه را خارج می کنیم و آنرا با قطره بافر HF جایگزین می کنیم. با کاهش قطر معزی، میدان میرا افزایش می یابد و کاهش نمایی را در توان عبوری در زمان میان $60\text{-}100$ دقیقه مشاهده می کنیم. برای داشتن تیپرهای با قطر کمتر از طول موج، ما قطره بافر را وقتی بر می داریم که توان عبوری کمتر از 10 P_0 باشد. P_0 پیک توان طیف در آغاز فرایند خوردگی است. در صورتی که خوردگی زودتر متوقف شود تیپرهای غیرآدیباتیک خواهیم داشت همانطور که از مقایسه دو شکل ۵(الف) و (ب) مشاهده می شود.



شکل ۳. اندازه گیری توان عبوری در حین فرایند خوردگی

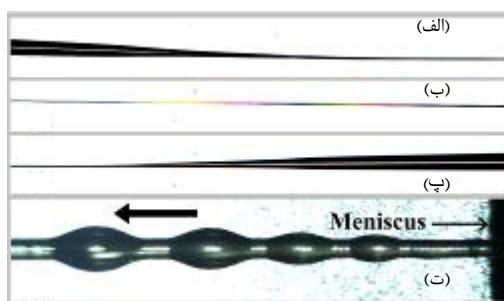
پس از اتمام فرایند خوردگی و شستشو، اتلاف ذاتی 0.52 dB در هوای برای یک تیپر با قطر کمر $1\text{ }\mu\text{m}$ و 4.5 dB وقتی تیپر با قطر $2\text{ }\mu\text{m}$ در آب قرار گرفته است بدست آمده است. طول ناحیه باریک حدود 5 mm است. ما این آزمایش را بارها تکرار کرده ایم و کمترین اتلافی که بدست آورده ایم حدود 0.06 dB/mm و 0.36 dB بوده است که قابل مقایسه با نتایج گزارش شده در [7] معادل 0.1 dB/mm است.

در حین آزمایش، پیشرفت خوردگی و کیفیت تیپر با اندازه گیری اتلاف عبوری فیبر توسط تحلیلگر طیف نوری و اندازه گیری قطر فیبر توسط یک سیستم میکروسکوپی پایش می شود. وقتی قطر تیپر به کمتر از $5\text{ }\mu\text{m}$ میرسد دیگر امکان اندازه گیری با سیستم میکروسکوپی مذکور وجود ندارد، از اینرو پس از پایان آزمایش اندازه گیری قطر توسط میکروسکوپ SEM انجام شده است.

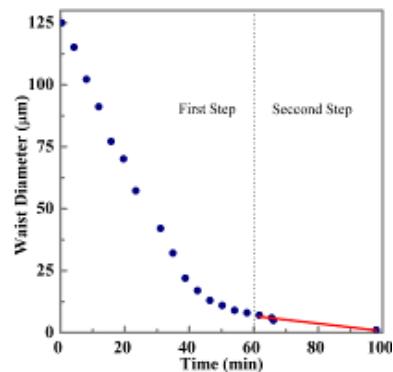
۳-۴ یافته ها

۳-۱ ناحیه گذار

شکل ۲ (الف-پ) پروفایل نرم نواحی گذار و ناحیه کمر تیپر را نشان می دهد. شکل گیری این نواحی را کاملاً می توان با استفاده از اثری موسوم به Marangoni effect توضیح داد [7]. کشش سطحی سبب می شود میکروقطره در امتداد فیبر کشیده شود (شکل ۲.ت) و این پدیده باعث می شود یک پروفایل قطر گرادیانی در راستای فیبر ایجاد شود.



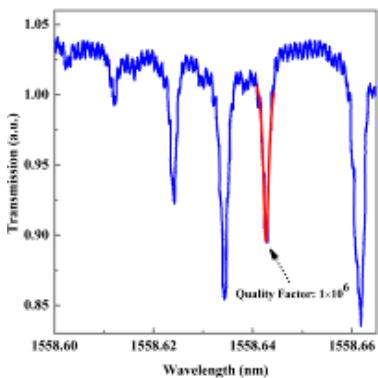
شکل ۲. (الف-پ) پروفایل نرم نواحی گذار و کمر فیبر باریک شده (ت) اثر Marangoni



شکل ۳. تغییرات قطر کمر فیبر با زمان خوردگی

۳-۲ اندازه گیری قطر فیبر

در شکل ۳ تغییرات قطر کمر فیبر را نسبت به زمان خوردگی مشاهده می کنید. قطر کمر در مرحله اول به صورت غیرخطی تغییر می کند در حالیکه در مرحله دوم این تغییر خطی است



شکل ۵: طیف WGM یک میکروکره با قطر μm . قطر تیپر μm . حدود است.

۴-۳ کاربرد: برانگیزش مدهای WGM میکروکره با استفاده از فیبر باریک شده

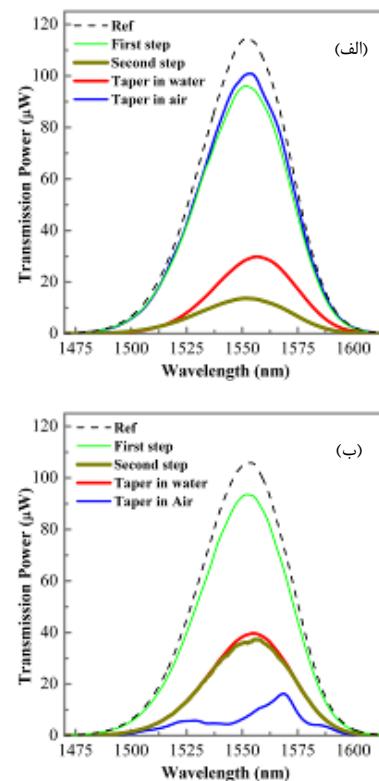
برای نشان دادن کاربرد تیپرهای ساخته شده، میکروکره های با قطرهای ۱۰۰-۵۰۰ μm را برای آزمایش جفت شدگی در محیط آبی بکاربرد ایم. قطر تیپرها حدود ۲-۲ μm است. میکروکره ها را با ذوب کردن انتهای یک فیبر ساده یا باریک شده با استفاده از دستگاه جوش فیبر ساخته ایم. برای برانگیزش مدهای میکروکره، تیپر را در نزدیکی استوای میکروکره قرار می دهیم. سپس با اسکن طول موج یک لیزر تنظیم پذیر در بازه طول موجی μm ۱.۵۵ و آشکارسازی خروجی فیبر توسط یک فتوودتکتور، طیف رزونانس میکروکره را ثبت می کنیم.

۴- نتیجه گیری

ما روشی ساده و تکرار پذیر برای ساخت فیبر باریک شده آدیاباتیک با اتلاف عبور کم با استفاده از یک روش خورددگی نشان داده ایم. خورددگی در دو مرحله انجام شده است، بدین ترتیب کنترل کافی بر اتمام فرایند خورددگی تامین می شود. بعلاوه، وقتی قطر فیبر آنقدر کم می شود که اندازه گیری مستقیم اپتیکی دیگر امکان پذیر نیست، پایش زنده فرایند خورددگی توسط طیف عبوری زمان پایان فرایند را تعیین می کند. نشان دادیم از یک فیبر باریک شده به این روش می توان برای برانگیزش موثر مدهای WGM یک میکروکره استفاده کرد.

مراجع

- [1] D. K. Armani, T. J. Kippenberg, S. M. Spillane & K. J. Vahala, *Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip*, *Nature* 421, (2003) 925-928.
- [2] A. M. Armani, R. P. Kulkarni, S. E. Fraser, R. C. Flagan, K. J. Vahala, *Label-Free Single-Molecule Detection with Optical Microcavities*, *Science* 317, (2007) 783-787.
- [3] K. A. Wilson, C. A. Finch, P. Anderson, F. Vollmer, J. J. Hickman, *Whispering gallery mode biosensor quantification of fibronectin adsorption kinetics onto alkylsilane monolayers and interpretation of resultant cellular response*, *Biomaterials* 33, (2012) 225-236.
- [4] S. M. Spillane, T. J. Kippenberg, O. J. Painter, K. J. Vahala, *Ideality in a Fiber-Taper-Coupled Microresonator System for Application to Cavity Quantum Electrodynamics*, *Phys. Rev. Lett.* 91, (2003) 043902.
- [5] J. M. Ward, D. G. O'Shea, B. J. Shortt, M. J. Morrissey, *Heat-and-pull rig for fiber taper fabrication*, *Rev. Sci. Instrum.* 77, (2006) 083105.
- [6] Ding, C. Belacel, S. Ducci, G. Leo, I. Favero, *Ultra-low loss single-mode silica tapers manufactured by a microheater*, *Appl. Opt.* 49, (2010) 2441-2445.
- [7] E. J. Zhang, W. D. Sacher, J. K. S. Poon, *Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers*, *Opt. Express* 18, (2010) 22593-22598.



شکل ۴. (الف) طیف عبوری تیپر ساخته شده با قطر نهایی μm ۱، اسید در $P_t/\max P_t$ خارج شده است (ب) تیپر با قطر نهایی μm ۲، اسید در $P_t/\max P_t$ ۲.۵ خارج شده است.

در رزونانس های WGM، تیپر امکان جفت شدن نور را به میکروکره می دهد که به صورت دره هایی در سیگنال شدت فتوودتکتور مشاهده می شود. یک فیت لورنتسی بر یکی از رزونانسها فاکتور کیفیتی برابر با 10^6 در محیط آبی را نشان می دهد. این فاکتور کیفیت را می توان با تنظیم دقیق گاف تیپر-میکروکره، قطبیش نور و قطر تیپر بهینه کرد.