بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

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

زینب چناری[۱]، حمید لطیفی[۱،۲] و فاطمه درودمند[۲]

[1]تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما،[۲] تهران، 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 *HF*) 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 *0.4* dB در هوا و *4.5* 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. Dorodmand[2]

[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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-30]

۱- مقدمه

میکرورزوناتورهای WGM[1] در حوزه های مختلف تحقیقاتی و تکنولوژی به خاطر حجم مد 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 روش های متعددی که پیشنهاد شده است، فیبر نوری باریک شده آدیاباتیک موسوم به تیپرهای آدیاباتیک نشان داده اند که موثرترین روش برانگیزش مدهای WGM هستند[4]. تیپرها امکان خارج شدن توان اپتیکی از فیبر را فراهم می کنند در حالیکه از مزیت انتقال سیگنال با استفاده از فیبر نیز بهره مند هستند. پروفایل آدیاباتیک این تیپرها، مد اصلی فیبر را در حین انتشار به مد اصلی تیپر در ناحیه باریک شده تبدیل می کنند و بالعکس که سبب می شود کمترین جفت شدگی میان مدهای هسته و مغزی فیبر صورت گیرد. به علاوه لازم است سطح تیپرها بسیار هموار باشد تا از اتلاف پراکندگی جلوگیری شود.

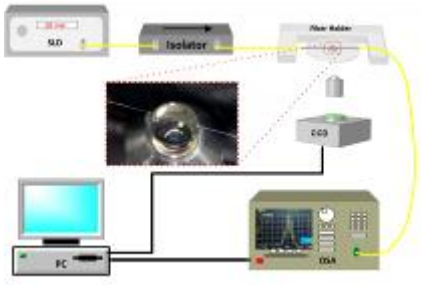
دو روش کلی برای ساخت تیپرهای آدیاباتیک وجود دارد، روش گرما-کشش و روش خوردگی با اسید. روش گرما-کشش روشی نسبتا سریع است و تیپرهای با اتلاف بسیار پایین تولید می کند. اما نیاز به استفاده و تنظیم پایه های موتوردار جهت کشش فیبر و یک منبع حرارتی مانند لیزر CO_2، میکروسرامیک هیتر و یا شعله دمای بالا دارند[5,6]. روش خوردگی 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 گرما-کشش تولید می کند[7]. به علاوه، تیپرهای ساخته شده به این روش طول کوتاهتری دارند و بنابراین برای اهداف مجتمع سازی مناسبتر هستند. اما این روش کنترل خوبی بر اتمام فرایند خوردگی ندارد.

در این مقاله، نشان می دهیم چگونه می توان با افزودن یک مرحلهٔ خوردگی به روش قطرهٔ اسید، تیپرهای آدیاباتیک با قطر کمتر از طول موج با اتلاف کم تولید کرد. تیپرهای ساخته شده عبور بیش از ۹۰٪ دارند به خاطر انتقال بسیار بهینه مد اصلی بخش باریک نشده به مد اصلی بخش باریک شده. نشان داده ایم که ویژگیهای نهایی تیپر را می توان دقیقا از طیف عبوری آن در حین ساخت بدست آورد.

۲- مواد و روش

۲-۱ روش ساخت

برای ایجاد خوردگی با اسید، باید بخشی از یک فیبرتک مدSMF-28 بدون روکش را که می‌خواهیم باریک شود در اسید قرار دهیم. هندسه نگهدارنده اسید تاثیر زیادی بر نرخ خوردگی و شکل نهایی فیبر باریک خواهد داشت. شماتیک نگهدارندهٔ طراحی شده در این آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. برای انجام خوردگی از دو قطعه استفاده شده‌است. 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 آبگریزی پتری دیش سبب می شود یک قطره روی سطحش شکل بگیرد. همچنین پتری دیش شفاف است و بنابراین قطر کمر فیبر را می توان از زیر آن با استفاده از یک میکروسکوپ اندازه گیری کرد. شکل قطره برای حجم مشخصی اسید همواره ثابت باقی بماند درنتیجه آزمایش تکرارپذیری بسیار خوبی خواهد داشت. حجم اسید ۱۰۰ µl بوده است وآزمایش‌ها در دمای 23 ± 3 °C انجام شده است.



شکل ۱. طرح شماتیک چیدمان باریک سازی فیبر نوری

خوردگی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول از اسید با غلظت بالاتر (۴۸٪) استفاده کردیم. اما بعد از خورده شدنِ بیش از ۸۰ درصد فیبر، از محلول بافر HF با نسبت حجمی ۶:۱ (40% wt NH_4F/ 48% HF) استفاده کرده ایم. باکاهش غلظت اسید نرخ خوردگی کاهش می‌یابد در نتیجه کنترل بیشتری بر زمان خوردگی خواهیم داشت. بعد از رسیدن فیبر به قطر کمر دلخواه، برای متوقف کردن خوردگی، 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 خوردگی

[1] Whispering gallery mode

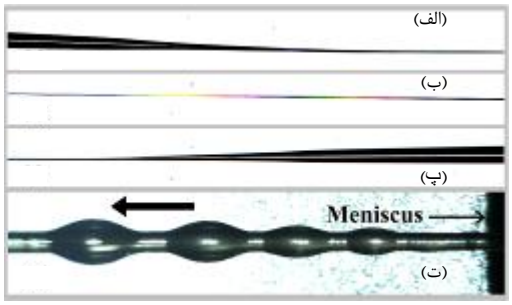
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-30]

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 5µm 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.

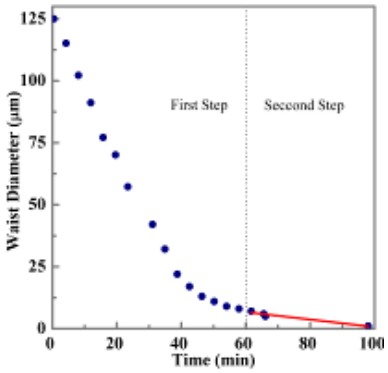
۳- یافته ها

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 اسید HF به صورت میکروقطره در امتداد فیبر کشیده شود (شکل۲.ت) و این پدیده باعث می شود یک پروفایل قطر گرادیانی در راستای فیبر ایجاد شود.



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



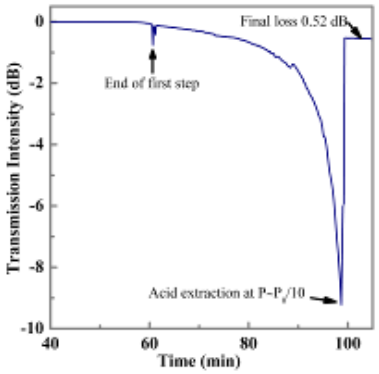
شکل ۳. تغییرات قطر کمر فیبر با زمان خوردگی

۳-۲ اندازه گیری قطر فیبر

در شکل۳ تغییرات قطر کمر فیبر را نسبت به زمان خوردگی مشاهده می کنید. قطر کمر در مرحله اول به صورت غیرخطی تغییر می کند درحالیکه در مرحله دوم این تغییر خطی است با نرخ خوردگی حدود ۱۶۰ 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 (۱۴۵۰nm-1650nm) با پروفایل گاوسی 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 درحین فرایند خوردگی اندازه گیری کنیم. شکل ۴ تغییرات پیک توان $(P_t)_{max}$ را با زمان نشان می دهد. در ۵۰ دقیقه اول، تغییر محسوسی مشاهده نمی شود چون قطر فیبر بزرگتر از ۱۰µmاست 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 بافرHF جایگزین می کنیم. با کاهش قطر مغزی، میدان میرا افزایش می یابد و کاهشی نمایی را در توان عبوری در زمان میان ۶۰-۱۰۰ 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 $P_0/10$ باشد.P_0 پیک توان طیف در آغاز فرایند خوردگی است. در صورتی که خوردگی زودتر متوقف شود تیپرهایی غیرآدیاباتیک خواهیم داشت همانطور که از مقایسه دو شکل ۵(الف) و(ب) مشاهده می شود.



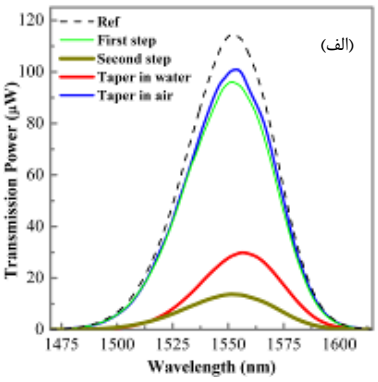
شکل ۳. اندازه گیری توان عبوری درحین فرایند خوردگی

پس از اتمام فرایند خوردگی و شستشو، اتلاف ذاتی 0.52 dB در هوا برای یک تیپر با قطر کمر۱µm (شکل۴) و 4.5 dB وقتی تیپر با قطر ۲µm در آب قرار گرفته است بدست آمده است. طول ناحیه باریک حدودmm ۵ است. ما این آزمایش را بارها تکرار کرده ایم و کمترین اتلافی که بدست آورده ایم حدود dB **0.36** (**0.06** dB/mm) بوده است که قابل مقایسه با نتایج گزارش شده در[7] معادل dB/mm **0.1** است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-30]

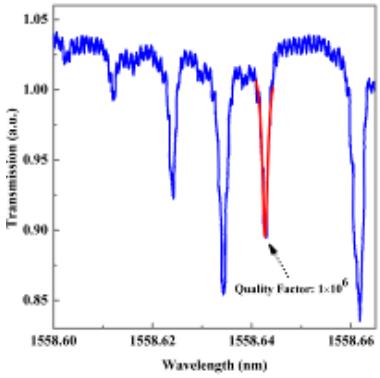
۴-۳ کاربرد: برانگیزش مدهای WGMمیکروکره با استفاده از فیبر باریک شده

برای نشان دادن کاربرد تیپرهای ساخته شده، میکروکره های با قطرهای 100-500µmرا برای آزمایش جفت شدگی در محیط آبی بکاربرده ایم. قطر تیپرها حدود 1-2µmبوده 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 1.55 µmو آشکارسازی خروجی فیبر توسط یک فتودتکتور، طیف رزونانس میکروکره را ثبت می کنیم.



شکل ۴. (الف) طیف عبوری تیپر ساخته شده با قطر نهایی۱µm، اسید در $(P_t)_{max}$~$P_0/10$ خارج شده است (ب) تیپر با قطر نهایی ۲µm، اسید در $(P_t)_{max}$~$P_0/2.5$ خارج شده است.

در رزونانس هایWGM، تیپر امکان جفت شدن نور را به میکروکره می دهد که به صورت دره هایی در سیگنال شدت فتودتکتور مشاهده می شود. یک فیت لورنتسی بر یکی از رزونانسها فاکتور کیفیتی برابر با 1×10^6در محیط آبی را نشان می دهد. این فاکتور کیفیت را می توان با تنظیم دقیق گاف تیپر-میکروکره، قطبش نور و قطر تیپر بهینه کرد.



شکل ۵: طیف WGM یک میکروکره با قطرµm ۴۶۰. قطر تیپرµm ۲ حدود است.

۴- نتیجه‌گیری

ما روشی ساده و تکرار پذیر برای ساخت فیبر باریک شده آدیاباتیک با اتلاف عبور کم با استفاده از یک روش خوردگی نشان داده ایم. خوردگی در دو مرحله انجام شده است، بدین ترتیب کنترل کافی بر اتمام فرایند خوردگی تامین می شود. بعلاوه، وقتی قطر فیبر آنقدر کم می شود که اندازه گیری مستقیم اپتیکی دیگر امکان پذیر نیست، پایش زنده فرایند خوردگی 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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-30]