

شبیه‌سازی و ساخت حسگر فیبر نوری نازک شده جهت آشکار سازی هیدروژن

علی ریاحی^۱، مهدی حیدری داینی^۲، محمد واحدی^{۳*}، جواد خلیل زاده^۴، یدالله شهامت^۵

۱- دانشجوی دکتری فیزیک اتمی، مولکولی دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت و پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک اتمی- مولکولی و ۳- استادیار، دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت

۴- دانشیار و ۵- پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(دریافت: ۹۷/۰۵/۰۸، پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۹)

چکیده: در این مقاله شبیه‌سازی و ساخت حسگر گازی براساس فیبر نازک شده به وسیله اندازه‌گیری طیف خروجی در حضور گاز با غلظت‌های مختلف هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده است. فیبرها با شعله اکسی بوتان تا قطرهای $15/5 \mu\text{m}$ و $26/6 \mu\text{m}$ نازک شده‌اند. سپس لایه‌نشانی به روش کندوپاش فیزیکی با ضخامت 14 nm انجام شد. خروجی حاصله با کمک لیزر فیدبک توزیعی در طول موج 1550 nm و تحلیل گر طیف نوری (OSA) به دست آمد و حساسیت حسگرها برای گاز هیدروژن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. این حساسیت به ترتیب برای فیبرهای $15/5 \mu\text{m}$ و $26/6 \mu\text{m}$ معادل 7 درصد تغییرات و $2/3$ درصد تغییرات در ازای حضور 4% هیدروژن و با زمان پاسخ 13 s و $17/6 \text{ s}$ به دست آمد. حسگرهای ساخته شده در آزمون تکرارپذیری نیز رفتار مورد قبولی را نشان دادند. همچنین شبیه‌سازی‌های انجام شده تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی را ارائه می‌دهند. تغییر محسوس شدت در غلظت‌های زیر 4% ، شناسایی هیدروژن را ساده و دقیق می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: حسگر گاز هیدروژن، فیبر نوری نازک شده، پالادیوم، میدان ناپایدار

۱- مقدمه

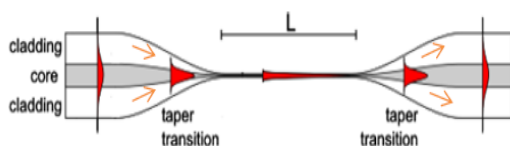
فیبرهای نوری یک ابزار انتقال بسیار مهم برای سیستم‌های ارتباطی نوری تا مسافت‌های طولانی و با ظرفیت زیاد می‌باشند. از ویژگی‌های منحصر به فرد فیبرهای نوری تلفات کم آن‌ها (در طول موج‌های مخابراتی) است. ضریب شکست بزرگتر هسته فیبر نسبت به ضریب شکست غلاف آن موجب می‌شود که وقتی نور با زاویه معین داخل هسته فیبر می‌شود، در مرز هسته و غلاف بازتاب داخلی کلی پیدا کرده و درون هسته در امتداد محور آن به حرکت ادامه دهد. فیبرهای نوری در دو گروه عمده تک‌مد و چندمد می‌توانند دسته‌بندی شوند که فیبرهای تک‌مد قطر هسته حدود $9 \mu\text{m}$ و چندمد قطر هسته حدود $60 \mu\text{m}$ دارند.

میدان نوری در فیبر از دو مؤلفه تشکیل شده است: قسمت نوسان‌کننده انتشار در هسته فیبر، که میدان هدایت، و قسمت واپاشی نمایی در غلاف، که میدان میرا نامیده می‌شوند. در یک فیبر با قطر یکنواخت، میدان میرا در داخل غلاف به صفر میل می‌کند و با سطح بیرونی غلاف برخوردی ندارد. میدان میرا زمانی که غلاف از بین برود به محیط اطراف نفوذ می‌کند، اما درصد نور در میدان میرا هنوز کم است. عمق نفوذ d_p یک مقیاس از

مسافتی را که میدان میرا خارج از سطح هسته-غلاف طی می‌کند، به ما می‌دهد و به صورت ریاضی برابر مسافتی است که میدان میرا به $\frac{1}{e}$ مقدار خود در سطح هسته-غلاف می‌افتد. لذا با شروع از سطح هسته-غلاف، میدان میرا به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$E(x) = E_0 \exp\left(\frac{-x}{d_p}\right) \quad (1)$$

در اینجا x فاصله از هسته فیبر است که $x=0$ مرز هسته-غلاف است؛ E_0 اندازه میدان میرا در مرز d_p عمق نفوذ است [۱]. از آنجا که میدان در غلاف فیبر به سرعت میرا شده و از بین می‌رود، با برداشتن چند میکرومتر از غلاف فیبر، می‌توان عمق نفوذ را افزایش داد و شرایط را برای برهمکنش با ماده مجهول مهیا نمود. به این منظور، فیبر نوری را به شکل باریک‌شده^۲ (شکل ۱) درمی‌آورند.



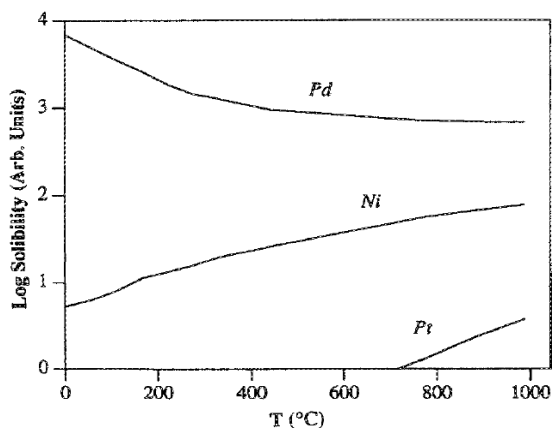
شکل (۱): فیبر نازک شده [۲]

این امر موجب می‌شود که فیبر نوری به تغییرات ضریب

² Tapered

این گاز امکان پذیر نمی باشد. بسیاری از حسگرهای هیدروژن در چند سال گذشته به اثبات رسیده و تجاری سازی شده اند اما نیاز به آشکارسازی موضعی در یک محیط خطرناک منجر به انتخاب حسگرهای فیبر نوری شده است. حسگرهای نوری در قیاس با حسگرهای الکتریکی بسیار ایمن تر هستند چراکه ایجاد جریان و جرقه الکتریکی در شناسایی گازهای قابل اشتعال سبب انفجار در محیط می شود. به دلیل حساسیت بالا و پاسخ زمانی سریع و ایمنی بیشتر، حسگرهای هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری اخیراً به منظور کاربردهایی در انرژی پاک و صنعت هوا-فضا توسعه یافته اند.

به منظور شناسایی هیدروژن، به یک لایه جاذب شیمیایی واکنش پذیر با آن نیازمندیم که بر روی فیبر نوری نازک شده قرار داده شود. این لایه به عنوان کاتالیست برای فرآیند جذب سطحی عمل می کند. اثرات کاتالیستی نقش مهمی را در حوزه آشکارسازی گاز ایفا می کنند. فرآیندهای کاتالیستی می توانند روی گزینش پذیری موثر باشند. شکل (۳) مقایسه حل پذیری هیدروژن در سه فلز مختلف نیکل، پلاتین و پالادیوم در فشار یک اتمسفر بر حسب دما را نشان می دهد که در آن پالادیوم پاسخ مناسبی در جذب هیدروژن از خود نشان می دهد.



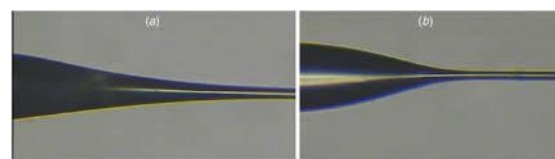
شکل (۳): وابستگی حل پذیری هیدروژن به دما برای فلزات مختلف [۵].

نموداری که در شکل (۴) آورده شده است، نشان دهنده حساسیت بسیار بالایی از پالادیوم نسبت به گاز هیدروژن در مقایسه با گازهای دیگر است. بنابراین، لایه نشانی پالادیوم روی فیبرهای نوری نازک شده به عنوان ماده بسیار واکنش پذیر با گاز هیدروژن از ضروریات عملکرد این حسگرها محسوب می شود. جذب هیدروژن با یک لایه نازک پالادیوم منجر به اصلاح ساختار شبکه روی موجب شده و در نتیجه ضریب شکست آن را تغییر می دهد.

هنگامی که پالادیوم در معرض هیدروژن قرار می گیرد، مولکولهای هیدروژن به دو اتم هیدروژن با نرخ تفکیک موثری در سطح پالادیوم تبدیل می شوند، سپس اتمهای هیدروژن به سرعت

شکست محیط اطراف بسیار حساس شود. زمانی که نور از طریق میدان میرا انتشار می یابد، ضریب شکست محیط خارج از فیبر بر نحوه انتشار نور در داخل فیبر تأثیر می گذارد. با آنالیز شدت نور خروجی می توان ویژگی های میدان میرا و از آنجا مشخصات (نوع و مقدار) ماده خارجی را به دست آورد. حسگرهای میدان میرای فیبر نازک، به دلیل حساسیت و عمق نفوذ بالا، ابعاد کوچک و وزن اندک توجهات زیادی به خود جلب کرده اند. از مزیت های این حسگرها می توان به سازگاری با محیط زیست، حساسیت بالا و زمان پاسخ کم اشاره نمود.

شکل نازک شدن فیبر نوری از مسائل اساسی در کارکرد حسگرهای فیبر نوری باریک شده محسوب می شود. مطابق شکل (۲) با توجه به نوع کاربرد و نحوه آشکارسازی، نازک سازی به دسته بندی های بی دررو^۳ و غیر بی دررو تقسیم می شود. در فیبر نوری باریک شده بی دررو بخش اعظم توان هنگام انتشار درون فیبر نوری در مد پایه باقی می ماند و به مدهای مرتبه بالاتر جفت نمی شود. در این حالت تغییرات شعاع فیبر نازک شده نسبت به مکان کم است. به عبارت دیگر کاهش شعاع در فیبر به آرامی صورت می گیرد.



شکل (۲): تصویری از فیبر نازک شده (a) بی دررو و (b) غیر بی دررو [۴]

در فیبر باریک شده غیر بی دررو، جفت شدگی بین مد پایه در فیبر نازک نشده و دو (یا چند) مد اولیه در موجبر نازک شده روی می دهد. از آنجایی که اختلاف بین ضریب شکست هوا و شیشه زیاد است، فیبر نازک شده به طور معمول بیشتر از یک مد را نگه می دارد. نتیجه جفت شدگی بین یک مد از فیبر معمولی و چندمد از فیبر نازک شده، نوسانات ایجاد شده در طیف تشدید فیبر نازک شده می باشد [۳]. در واقع در صورت استفاده از حسگری بر مبنای شدت بایستی، نازک سازی به صورت بی دررو و در صورت استفاده از حسگر بر مبنای تداخل سنجی بایستی به شکل غیر بی دررو باشد.

گاز هیدروژن به عنوان یک منبع پاک و سازگار با محیط زیست امروزه در برخی از نقاط کره زمین به عنوان منبع سوختی مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از عمده مسائل و مشکلات این گاز، ذخیره سازی و حمل و نقل آن است که اگر با احتیاط حمل نشود و حدود ۴٪ در محیط انتشار یابد، سبب انفجار مهیبی می شود. با توجه به بی رنگ و بی بو بودن این گاز، امکان شناسایی بدون حسگر

³ Adiabatic

۲- تئوری

برای یافتن مدهای فیبر نوری باید معادلات میدان الکتریکی و مغناطیسی در داخل فیبر محاسبه شوند و برای پیدا کردن معادلات باید معادله هلمهولتز در دستگاه مختصات استوانه‌ای حل شود. با کرل گرفتن از معادلات ماکسول، معادلات مربوط به امواج الکترومغناطیسی به شکل رابطه‌های (۲-۱) در می‌آیند.

$$\nabla^2 E = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$\nabla^2 H = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (3)$$

با حل معادلات (۴-۵) در دستگاه استوانه‌ای جواب معادله موج به صورت زیر می‌شود:

$$E = E_0(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (4)$$

$$H = H_0(r, \varphi) e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (5)$$

پارامتر β ثابت انتشار می‌باشد. وقتی که ثابت انتشار در رابطه (۶) صدق کند،

$$kn_{cl} < |\beta| < kn_{co} \quad (6)$$

مدها درون موجبر منتشر می‌شوند. با قرار دادن معادله موج در دستگاه معادلات استوانه‌ای، معادلات (۷-۸) به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + q^2 E_z = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + q^2 H_z = 0 \quad (8)$$

که در آن، $q^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2 = k^2 - \beta^2$ است. این معادلات هم برای هر دو ناحیه در فیبر با ضریب شکست پله‌ای و هم برای فیبرهای با ضریب شکست تدریجی صادق هستند.

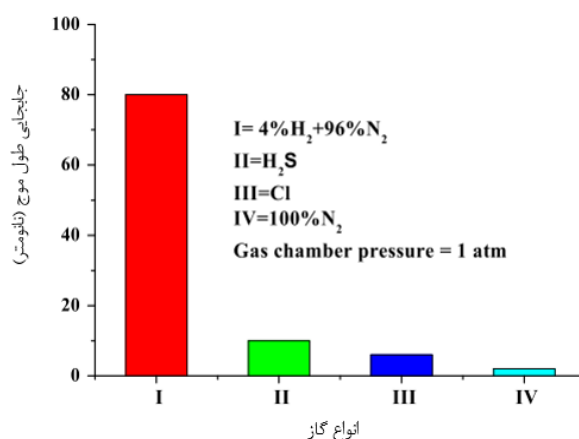
پاسخ مدها با توجه به صفر شدن H_z یا E_z مشخص می‌شود. هنگامی که H_z صفر است مد TM و هنگامی که E_z صفر می‌شود مد TE نامیده می‌شود. با حل معادله بسل و بعد از ساده‌سازی، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی داخل هسته به شکل روابط (۱۰-۸) به دست می‌آیند:

$$E_z(r < a) = A J_\nu(Ur) e^{i\nu\varphi} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (9)$$

$$H_z(r < a) = B J_\nu(Ur) e^{i\nu\varphi} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (10)$$

که در آن، $K_{co}^2 = \frac{2\pi n_{co}}{\lambda} U^2 = K_{co}^2 - \beta^2$ ، A و B اعدادی ثابت

درون فیلم پالادیوم پخش شده و به هیدریدهای برگشت‌پذیری به شکل PdH_x تبدیل می‌شوند که X نسبت اتمی پالادیوم به هیدروژن است. هیدرید پالادیوم خواص نوری، الکتریکی و مکانیکی متفاوت‌تری نسبت به فیلم پالادیوم بدون هیدروژن دارد. غلظت‌های پایین پالادیوم بدون هیدروژن در فاز آلفا قرار دارد. با افزایش نسبت اتمی Pd/H، به سمت فاز بتا پیشروی می‌کند که دارای ثابت شبکه بزرگتری نسبت به آلفا است. به‌طور تقریبی می‌توان گفت که اگر نسبت Pd/H کمتر از ۰/۱ باشد متناظر با فاز آلفا و اگر بزرگتر از ۰/۵ باشد متناظر با فاز بتا است. در فاز بتا، پالادیوم متورم شده و در نتیجه چگالی حجمی الکترون‌های آزاد کاهش می‌یابد که منجر به کاهش بخش‌های حقیقی و موهومی ضریب دی‌الکتریک مختلط می‌شود.



شکل (۴): جایگاهی طول موجی گازهای مختلف هنگام تماس با پالادیوم [۶].

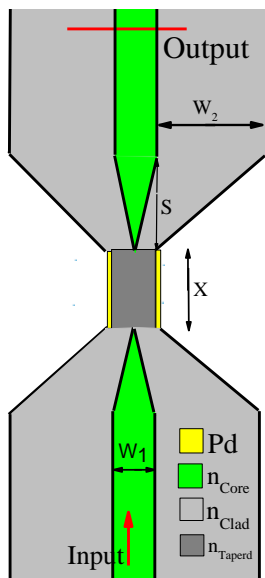
پس از انجام لایه‌نشانی، سیگنال نوری وارد فیبر نوری می‌شود. واکنش شیمیایی لایه جاذب با هیدروژن در ناحیه نازک‌شده سبب تغییر ضریب شکست مؤثر ماده جاذب می‌شود. این تغییرات در برهم‌کنش سیگنال نوری با لایه جاذب دیده می‌شود و سبب مدولاسیون شدت یا تغییر قطبش نور یا تغییر فاز آن می‌گردد که توسط آشکارساز قابل شناسایی است [۷].

در این مقاله، اندازه‌گیری هیدروژن با استفاده از تغییرات شدت خروجی در فیبر نازک‌شده تک‌مد بی‌دررو برای مقایسه پاسخ حسگر در قطرهای متفاوت گزارش می‌شود. در ابتدا، یک بحث نظری در مورد مدهای فیبر نوری قبل و بعد از نازک‌سازی مطرح می‌شود که برای ادامه بحث ضروری است. سپس نتایج شبه‌سازی و در نهایت تست‌های آزمایشگاهی برای فیبرهای نازک شده با طول یکسان و قطرهای متفاوت $15/5 \mu m$ و $26/6 \mu m$ گزارش می‌شود.

می‌شود، پارامتر V تغییر کرده و تعداد مدهای انتشاری نیز تغییر می‌کند. به‌عنوان نمونه، برای فیبر SMF تجاری معمولی تنها یک مد در داخل موجبر حرکت می‌کند اما در فیبر نازک شده به قطر $10 \mu\text{m}$ (با فرض هوا به‌عنوان پوسته) چندین مد می‌تواند در داخل فیبر حرکت کند که بسته به طول موج تعداد آن مشخص می‌شود. در نهایت، طول موج، زاویه فرودی و نحوه نازک‌سازی در این‌که چند مد در ناحیه نازک‌شده تحریک شوند، موثر است. بدین معنی که اگر زاویه نازک‌سازی خیلی کم باشد، فیبر بی‌دررو شده و فقط یک مد در آن ناحیه تحریک می‌شود و اگر این زاویه بزرگتر باشد، مدهای بیشتری در فیبر می‌تواند تحریک شده و طرح تداخلی مشاهده شود و فیبر غیر بی‌دررو خواهیم داشت [۳ و ۸].

۳- شبیه‌سازی

جهت شبیه‌سازی، از روش Beam Propagation Method و نرم‌افزار RSOFT استفاده شده است. به‌منظور شبیه‌سازی، از فیبری با قطر هسته $9 \mu\text{m}$ و قطر پوسته $125 \mu\text{m}$ استفاده شده است. مطابق شکل (۵) سیگنال ورودی با مد اصلی گاوسی مربوط به لیزر 1550 nm در قسمت پایین، نور را تحریک نموده و مقدار عبور در انتهای فیبر به‌دست می‌آید.



شکل (۵): طرح‌واره‌ای از فیبر نازک شده با مشخصات مربوطه

شکل‌های (۶-۷) نحوه انتشار و توزیع میدان در ناحیه هسته و پوسته فیبر را به‌ترتیب برای حالت بدون هیدروژن و غلظت 4% هیدروژن نشان می‌دهند. مطابق شکل تداخل مدها در قسمت نازک شده قابل مشاهده می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۶ آورده شده است.

و v یک عدد صحیح هستند. جواب‌ها برای خارج از ناحیه هسته به‌شکل روابط (۱۲-۱۱) حاصل می‌شوند

$$E_z(r > a) = CK_v(Wr)e^{iv\varphi}e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (11)$$

$$H_z(r > a) = DK_v(Wr)e^{iv\varphi}e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (12)$$

که در آن، $K_{cl} = \frac{2\pi n_{cl}}{\lambda}$ ، $W^2 = \beta^2 - k_{cl}^2$ و C و D اعداد ثابت می‌باشند.

ثابت‌های انتشار با اعمال شرایط پیوستگی برای میدان‌ها در سطح بین هسته-غلاف به‌دست می‌آیند. در حالت کلی، مدها به دو کلاس EH و HE تقسیم می‌شوند. هیچ‌یک از این مدها TE و TM نیستند، زیرا هیچ‌کدام از مؤلفه‌های آن‌ها صفر نیستند؛ بنابراین، به آن‌ها مدهای مختلط گفته می‌شود. زمانی که $l = 0$ ، مدهای HE و EH به‌ترتیب به مدهای TE و TM کاهش می‌یابند.

در فیبرهای معمولی، ضرایب شکست هسته و غلاف مشابهند. تحت این شرایط، می‌توان مدها را تقریباً قطبیده خطی در نظر گرفت. این بدین معناست که جهت مؤلفه‌های عرضی میدان‌ها با مکان تغییر نمی‌کند. پایین‌ترین مرتبه مد قطبیده خطی (LP_{1m}) مد LP_{01} و مد بعدی LP_{11} است. اگر اختلاف بین ضرایب هسته و غلاف را نتوان ناچیز در نظر گرفت، باید مد LP_{01} با مد HE_{11} و مد LP_{11} با مدهای TM_{01} ، TE_{01} ، HE_{21} جایگزین شوند.

تعداد مدهای قابل انتشار درون فیبر نوری با پارامتر V مشخص می‌شود. پارامتر V مربوط به هسته در طول فیبر به‌صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود و به‌صورت خطی با شعاع موضعی هسته تغییر می‌کند.

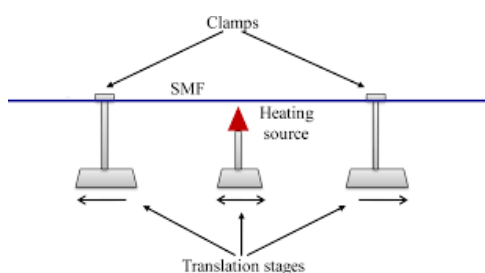
$$V = \frac{2\pi\rho(z)}{\lambda} \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)} \quad (13)$$

ثابت انتشار برای مد موضعی در شعاع $\rho(z)$ با حل معادله ویژه مقدار برای فیبر نازک نشده به‌دست می‌آید که مقدار آن طبق رابطه (۱۴) خواهد بود.

$$V(z) = 2.28 \frac{\rho(z)}{\rho(0)} \quad (14)$$

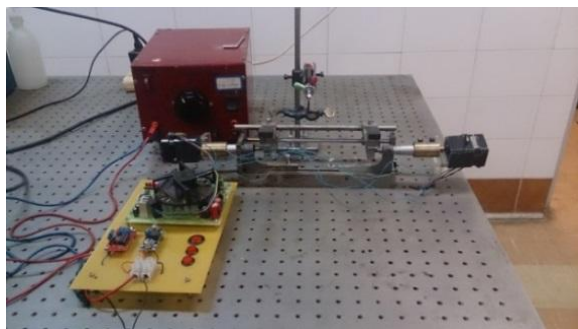
باریک کردن فیبر نوری تک مد به‌دلیل تغییر شکل در ساختار آن منجر به از دست دادن توان از مد پایه هسته می‌شود. همان‌طور که این مد در فیبر باریک شده انتشار می‌یابد، میدان نمی‌تواند توزیع خود را با سرعت کافی همراه با تغییرات مد پایه در هر نقطه تغییر دهد و مقداری اتلاف در شدت خروجی ایجاد می‌شود که ناشی از جفت شدن مد پایه با مدهای مرتبه بالاتر است.

هنگامی که عملیات نازک‌سازی بر روی فیبر نوری انجام



شکل (۸): نحوه نازک‌سازی فیبر

در این روش، بخشی از فیبر تا نزدیک نقطه ذوب گرم می‌شود. از شعله و لیزر دی‌اکسیدکربن به‌عنوان منابع گرمایش استفاده می‌شود. در این آزمایش از شعله گاز اکسی بوتان استفاده شده است. علت استفاده از اکسیژن بالا بردن دمای شعله و تیز کردن آن است که حرارت تا جایی که امکان دارد به یک نقطه از فیبر اثر کند. همانگونه که در شکل (۸) نشان داده شده است فیبر نوری با دو موتور پله‌ای با سرعت تقریبی 1 mm/s از طرفین کشیده می‌شود. بعد از گرم شدن فیبر نوری، ویسکوزیته فیبر نوری کاهش و سپس فیبر نرم می‌شود و به‌آسانی با موتور کشیده می‌شود. در نتیجه به‌علت نیروی کششی ایجادشده توسط دو موتور پله‌ای از دو طرف، فیبر باریک می‌شود.

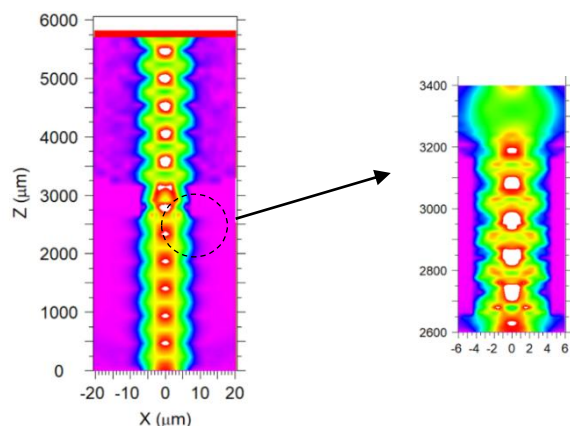


شکل (۹): نمایی از سیستم نازک‌سازی فیبر

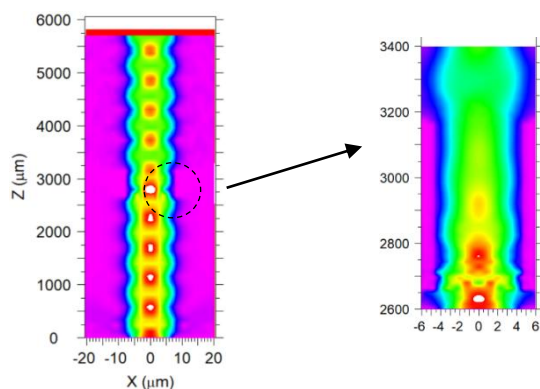
به‌منظور تصویربرداری آنلاین و مشاهده قطر لحظه‌ای فیبر نوری نازک‌شده در ابعاد بسیار بزرگ و بدون جابجایی فیبر نوری، دوربین دیجیتال و مدل IS30 Canonpowershot 30X به همراه عدسی شیئی مدل Mitutoyo 10x با $NA=0.28$ و فاصله کانونی 2 cm مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲- لایه‌نشانی

بعد از نازک شدن فیبر به‌اندازه دلخواه، لایه‌نشانی به‌روش کندوپاش فیزیکی تحت فشار $6/6 \text{ mtorr}$ و توان 78 W صورت گرفت و ضخامت لایه‌نشانی پالادیوم 14 nm به‌دست آمد.



شکل (۶): نحوه انتشار و توزیع میدان در داخل فیبر برای حالت بدون هیدروژن



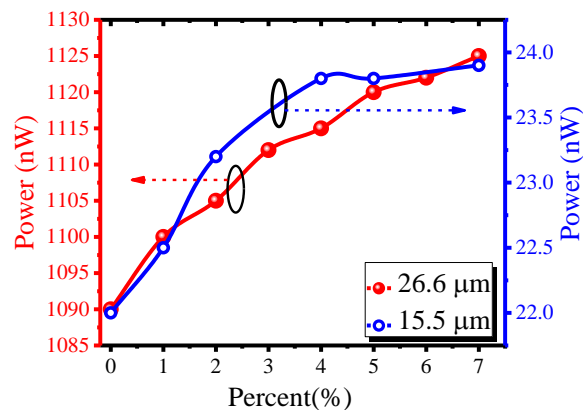
شکل (۷): نحوه انتشار و توزیع میدان در داخل فیبر برای حالت گاز هیدروژن با غلظت ۴٪

۴- بخش آزمایشگاهی

۴-۱- طراحی و ساخت فیبر نازک‌شده

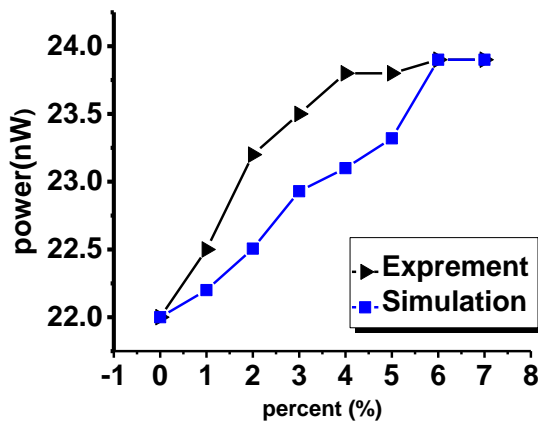
جهت انجام آزمایش‌ها، از فیبر نوری تک‌مد نازک‌شده به قطر پوسته $125 \mu\text{m}$ و قطر هسته $9 \mu\text{m}$ استفاده شد. ابتدا فرآیندهای مقدماتی اعم از برداشتن روکش فیبر جهت دستیابی به پوسته فیبر و تمیزکاری با اتانول برای شروع نازک‌سازی انجام می‌شود. روش‌های مختلفی اعم از شیمیایی و گرما-کششی برای نازک‌سازی فیبر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین مزیت روش گرماکششی، همواری سطح است که باعث کاهش اتلاف می‌شود. به‌علاوه روشی سریع برای ساخت فیبر نوری باریک محسوب می‌شود. کنترل این زاویه در روش گرما-کششی به میزان و نحوه وارد کردن نیرو وابسته است. همچنین برای تعیین قطر کمر باید پارامترهای مختلفی مانند میزان و نحوه کشش و قطر شعله تنظیم شود که این کار پیچیدگی‌های خاص خود را دارد.

با توجه به شکل و مقایسه شیب حاصل از دو نمودار می‌توان پی برد که حساسیت فیبر نوری به قطر $15/5 \mu\text{m}$ نسبت به قطرهای $26/6 \mu\text{m}$ بیشتر است و این حساسیت به ترتیب برای قطرهای $15/5 \mu\text{m}$ و $26/6 \mu\text{m}$ معادل ۷ درصد تغییرات در ازای ۰/۴ هیدروژن و ۲/۳ درصد تغییرات در ازای ۰/۴ هیدروژن می‌باشد. با توجه به تغییرات شدت ضرایب شکست حقیقی و موهومی هر دو در افزایش شدت خروجی تاثیرگذار هستند.



شکل (۱۲): مقایسه شدت برحسب درصد هیدروژن برای دو نمونه فیبر نوری. محور راست مربوط به قطر $15/5 \mu\text{m}$ و محور سمت چپ مربوط به قطر $26/6 \mu\text{m}$ می‌باشد.

به منظور اطمینان از نتایج تجربی، شبیه‌سازی برای هر دو فیبر نیز انجام شده است که شکل (۱۳-۱۴) به ترتیب نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی برای فیبر نازک‌شده به قطر ناحیه نازک‌شده $15/5 \mu\text{m}$ و همچنین برای فیبر نازک‌شده به قطر $26/6 \mu\text{m}$ مقایسه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توافق نسبتاً خوبی میان نتایج مشاهده می‌شود.



شکل (۱۳): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی برای فیبر با قطر $15/5 \mu\text{m}$

۳-۴- طراحی و ساخت محفظه گاز

طراحی یک محفظه که نمونه گازی و فیبر نوری باریک شده را در برمی‌گیرد ضروری می‌باشد. طبق شکل (۱۰) جنس محفظه گاز از لوله شیشه‌ای به قطر داخلی $2/5 \text{ mm}$ است که دارای ورودی و خروجی می‌باشد که در دو انتهای آن، فیبر نوری جوش داده می‌شود.



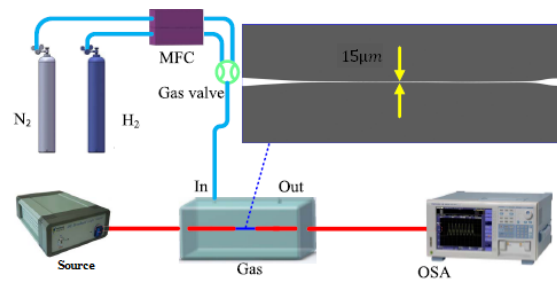
شکل (۱۰): محفظه گاز استفاده شده

۴-۴- چیدمان آزمایش

مطابق شکل (۱۱) نور منتشر شده در داخل فیبر تک‌مد (SMF125/9) از یک منبع لیزر فیدبک توزیعی با پهنای باند $0/1 \text{ nm}$ و توان 2 mW ایجاد می‌شود که توسط کنترل‌کننده دما و جریان تا 2 nm قابلیت جابجایی طول‌موج را دارد.

دو دستگاه کنترل‌کننده شارش جرمی گاز (MFC) یکی Alicat MC-Series با زمان پاسخ 100 میلی‌ثانیه متصل به خروجی کپسول هیدروژن و یکی YFC 100 با زمان پاسخ کمتر از 1 s ثانیه متصل به خروجی کپسول نیتروژن جهت تعیین درصد معینی از گاز استفاده شده است.

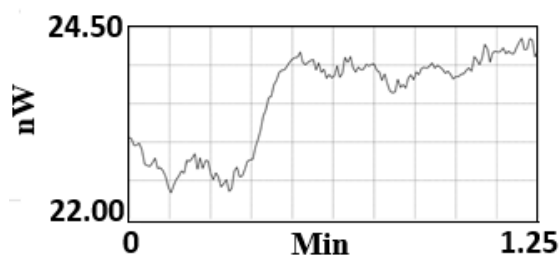
تغییرات حاصل از توان و طول‌موج در دستگاه تحلیلگر طیف نوری (OSA 203B) مربوط به شرکت Thorlabs با دقت طیفی 2 pm مشاهده می‌شود.



شکل (۱۱): چیدمان آزمایش [۹]

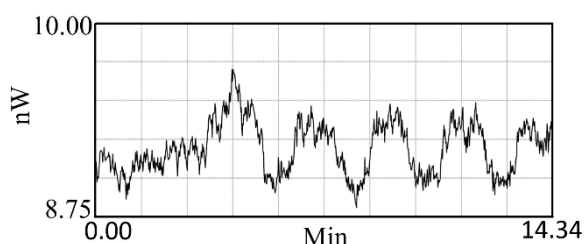
۵- نتایج و بحث

تغییرات شدت برحسب درصد هیدروژن برای فیبرهای نوری با قطرهای $15/5 \mu\text{m}$ و $26/6 \mu\text{m}$ در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

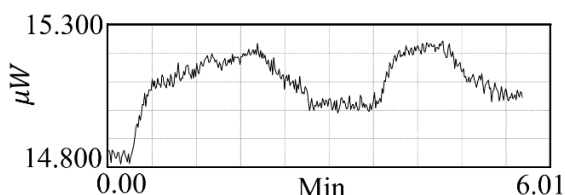


شکل (۱۶): نشان‌دهنده زمان پاسخ ۱۳ ثانیه برای قطر ۱۵ μm

در شکل‌های (۱۷-۱۸) تکرارپذیری حسگر برای فیبرهای با قطر ناحیه نازک‌شدگی ۱۵/۵ μm و ۲۶/۶ μm نشان داده شده است.



شکل (۱۷): تکرارپذیری حسگر برای فیبر با قطر نازک‌شدگی ۱۵/۵ μm



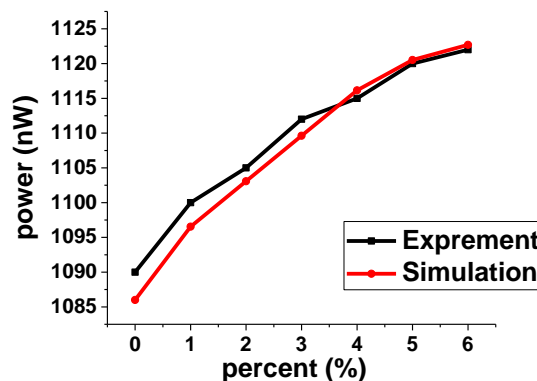
شکل (۱۸): تکرارپذیری حسگر برای فیبر با قطر نازک‌شدگی ۲۶/۶ μm

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از دو فیبر با قطرهای مختلف نازک‌شده ۲۶/۶ μm و ۱۵/۵ μm و ضخامت لایه‌نشانی یکسان ۱۴ nm پالادیوم برای آشکارسازی گاز هیدروژن استفاده شده است. نتایج تجربی بدست آمده نشان می‌دهند که برای فیبرهای با قطر نازک‌شده کمتر حساسیت و زمان پاسخ بهتری به‌دست می‌آید. شبیه‌سازی مربوطه برای هرکدام از فیبرها انجام شده است که نتایج حاصله از شبیه‌سازی با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد. با توجه به نتایج خوبی که این حسگرها برای گاز هیدروژن به‌عنوان یک مثال از خود نشان داده‌اند، در کارهای بعدی می‌توان از این حسگرها جهت استفاده در آشکارسازی گازهای دیگر نیز بهره‌برداری نمود.

۷- منابع

- [1] M. Pospíšilová, G. Kuncová, J. Trögl "Fiber-Optic Chemical Sensors and Fiber-Optic Bio-Sensors", Sensors, 2015, 15, 25208-25259.

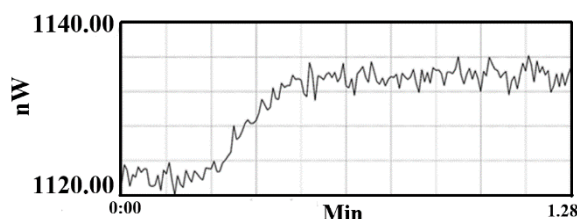


شکل (۱۴): مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی برای فیبر با قطر ۲۶/۶ μm

لازم به توضیح است که حساسیت آشکارسازی توان در آشکارساز می‌باشد که با توجه به پهنای طیفی لیزر (۰/۱ nm) خطای ایجاد شده در آشکارسازی معادل ۰/۱ nW خواهد شد. همچنین، خطای اندازه‌گیری شار نیز یک صدم درصد می‌باشد.

همان‌طور که از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود، فیبر با قطر کوچک‌تر حساسیت بیشتری نسبت به فیبر با قطر بزرگ‌تر از خود نشان می‌دهد که این به‌علت عمق نفوذ بیشتر در فیبر نازک‌تر می‌باشد که این مسئله با استفاده از شبیه‌سازی در مرجع [۱۰] نشان داده شده است. دلیل این امر، از دید اپتیک موجی، این است که در قسمت نازک شده، در صورت کم بودن قطر، مدهای مرتبه بالاتری تحریک می‌شوند. این مدها گسترده‌تری فضایی بیشتری دارند و نسبت توان در قسمت میرا به کل توان بیشتر خواهد بود و در نتیجه حساسیت بیشتری خواهیم داشت.

علاوه بر حساسیت، در این کار، زمان پاسخ حسگر نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل‌های (۱۵-۱۶) به‌ترتیب زمان پاسخ ۱۷/۶ s برای قطر ناحیه نازک‌شده ۲۶/۶ μm و زمان پاسخ ۱۳ s برای قطر ناحیه نازک شده ۱۵/۵ μm نشان داده شده است. کم بودن زمان پاسخ در فیبر با قطر کمتر نیز به‌دلیل همان افزایش عمق نفوذ و افزایش حساسیت حسگر می‌باشد.



شکل (۱۵): نشان‌دهنده زمان پاسخ ۱۷/۶ s ثانیه برای قطر ۲۶ μm

- [7] M. Tabib-Azar, B. Sutapun, and R. Petrick, "Highly sensitive hydrogen sensors using palladium coated fiber optics with exposed cores and evanescent field interactions", *Sensors and Actuators B*, 1999, 56, 158-163.
- [8] A. B. H. Negari, "Tapered optical fiber platform for high sensitivity refractive index sensing application", Phd Thesis, University of Dayton, 2014.
- [9] Z. Yu, Long Jin, L. Sun, J. Li, Y. Ran, and B. Guan, "Highly Sensitive Fiber Taper Interferometric Hydrogen Sensors", *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8.
- [10] M. Ahmad, L.L. Hench, "Effect of taper geometries and launch angle on evanescent wave penetration depth in optical fibers", *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 20, 1312-1319.
- [2] K. Mullaney, "The fabrication of micro-tapered optical fibres for sensing application", PhD Thesis, Centre for Engineering Photonics, School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, 2016.
- [3] A. Ghatak, K. Thyagrajan, "Introduction to fiber optics", Cambridge university press, 1998.
- [4] MI Zibaii, H Latifi, M Karami, M Gholami, SM Hosseini, MH Ghezelayagh, "Non-adiabatic tapered optical fiber sensor for measuring the interaction between α -amino acids in aqueous carbohydrate solution", *Meas. Sci. Technol.* 21, 105801, 2010.
- [5] C. Christofides, A. Mandelis, "Solid state sensor for trace hydrogen gas detection", *Journal of Applied Physics*, 1990, 68, R1-R30.
- [6] R. Tabassum, B. D. Gupta, "Fiber optic hydrogen gas sensor utilizing surface plasmon resonance and native defects of zinc oxide by palladium", *Journal of Optics*, 2015, 18, 015004.

Simulation and Fabrication of Tapered Fiber Optics Hydrogen Sensor

A. Riahi, M. Heydari Dayni, M. Vahedi*, J. Khalilzadeh, Y. Shahamat

Iran University of Science and Technology

(Received: 30/07/2018, Accepted: 08/02/2019)

Abstract

In this paper, we report simulation and fabrication of a gas sensor based on tapered fiber by measuring the output power in the presence of different hydrogen concentrations. The fibers were tapered to 15.5 μm and 26.6 μm by using oxy-butane torch and thin film deposition with the thickness of 14nm was done by physical vapor sputtering method. The output spectrum is obtained using a 1550nm laser source and an optical spectrum analyzer (OSA) and the sensitivities of the tapered fiber sensors are determined. It is shown that by increasing the percentage of the hydrogen in the surrounding environment, and in the presence of 4% hydrogen for tapered fibers of diameter 15.5 μm and 26.6 μm , the output power is changed by 7% and 2.3% with sensor response times of 13 and 17.6 seconds respectively. In addition, the repeatability tests of the fabricated sensors demonstrate acceptable results. Simulation of the tapered fiber sensors demonstrates good agreement with experimental results. Perceptible change in intensity for densities below 4% makes hydrogen detection easy and accurate.

Keywords: Tapered Optical Fiber, Hydrogen Sensor, Palladium, Evanescent Field

* Corresponding author E-mail: Mvahedi@iust.ac.ir