بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

# بررسی وابستگی حساسیت حسگر فیبرنوری نازک شده گاز هیدروژن به زاویه نازک سازی

**محمدنژاد، محمد؛ دستجردی، وحید؛ واحدی، محمد؛ زمانی میمیان، محمدرضا**

**دانشکده فیزیک دانشگاه علم و صنعت تهران، نارمک، تهران**

**در این تحقیق با ا ستفاده از فیبر نوری تک مد و با روش ک شش و شعله، فیبر نوری نازک شده تهیه شد. سپس با ا ستفاده از روش کندوپاش مغناطیسی میزان ۲۰ نانومتر فلز پالادیوم به عنوان لایه جاذب بر روی فیبرها لایه نشانی شد. میزان جابجایی طیفی هر فیبر به ازای در صدهای مختلف گاز هیدروژن (۰ تا ۸ در صد) تو سط تحلیلگر طیفی در دمای اتاق ثبت و میزان ح سا سیت طیفی حسگر فیبر نوری نازک شده به مقدار $۱/۷\times۱۰^{۵}$ nm/RIU بد ست آمد. همچنین نشان داده شده ا ست که با افزایش زاویه نازک سازی حساسیت حسگر افزایش می یابد.**

کلید واژه- حسگر فیبر نوری نازک شده، حساسیت طیفی، حسگر گاز هیدروژن

# Effect of Taper Angle on Sensitivity of Tapered Optical Fiber Hydrogen Gas Sensor

Mohammadnezhad, Mohammad; Dastjerdi, Vahid; Vahedi, Mohammad; Zamani, Mohammadreza

School of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran

In this research, a tapered optical fiber was fabricated using single-mode optical fiber by a stretch and flame method. Then, using a magnetic sputtering method, 20 nm of palladium metal was deposited as an absorbent layer on the fiber. Spectral displacement of each fiber for various percentages of hydrogen gas (0 to 8%) was recorded in the room temperature by the optical spectral analyzer and the spectral sensitivity of $1/17\times10^{5}$ nm/RIU was gained. It is shown that the sensitivity is increases by increasing the taper angle.

Keywords: tapered optical fiber sensor, spectral sensitivity, $H_2$ gas sensor

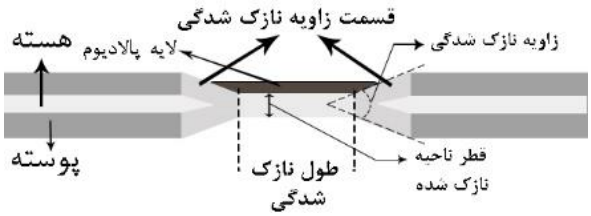


این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

## مقدمه

امروزه با توجه به تنوع گسترده‌ای که در انواع حسگر مشاهده می‌شود، ارائه حسگری که از نظر سرعت و دقت نسبت به روش‌های پیش از خود دارای برتری‌هایی باشد اهمیت می‌یابد. فیبر نوری به دلیل حساسیت بالا و آشکارسازی سریع، گزینه قابل قبولی برای ارائه یک حسگر مناسب در کاربردهای مختلف می‌باشد. در فیبر نوری استاندارد، شدت میدان موج در سطح خارجی تقریبا صفر می‌باشد، بنابراین انتشار نور در اینگونه فیبرها به محیط اطراف حساسیت چندانی ندارد. یکی از راه‌های حساس کردن فیبرنوری نسبت به محیط بیرون، نازک سازی آن می‌باشد. با نازک کردن فیبر نوری به دلیل کاهش قطر فیبر نوری و افزایش گشودگی عددی، مقدار عمق نفوذ و شدت میدان موج میرا افزایش می‌یابد[۱و۲]. این امر موجب افزایش حساسیت خروجی فیبر نوری نسبت به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف خواهد شد. جهت تشخیص هیدروژن در حسگر فیبر نوری نازک‌شده می‌بایست از لایه جاذب مناسب استفاده کرد که از اکسید تنگستن ($WO_3$)[۳] و پالادیوم استفاده می‌شود. پالادیوم به عنوان یک واکنش‌دهنده با هیدروژن دارای خواص به‌خصوصی است. هنگامی که هیدروژن در نزدیکی لایه پالادیوم قرار می‌گیرد، هیدوژن مولکولی ($H_2$) با سرعت بالایی به هیدروژن اتمی (H) تبدیل می‌شود. سپس اتم‌های هیدروژن بر روی سطح لایه پالادیوم پخش شده و به سرعت به هیدرید پالادیوم ($PdH_x$) تبدیل می‌شوند (x نسبت اتمی H به Pd را نشان می‌دهد). از نظر فیزیکی تغییر شبکه پالادیوم منجر به افزایش پارامتر شبکه آن می‌شود. در نتیجه حجم لایه پالادیوم (حتی تا ۹۰۰ برابر) گسترش یافته و ثابت شبکه آن کاهش می‌یابد [۴]. با لایه‌نشانی پالادیوم بر روی سطح فیبرنوری و تغییر میزان غلظت هیدروژن محیط اطراف، حجم و ثابت دی‌الکتریک پالادیوم تغییر کرده و موجب تغییر در شدت تابش، طول موج و یا فاز پرتوهای عبوری می‌شود. اندازه‌گیری مقدار تغییر هر یک از این کمیت‌ها مقدار غلظت هیدروژن را مشخص می‌کند [۶ و ۷].




شکل ۱: طرحواره فیبر نازک شده و قسمت‌های مختلف آن

## روش آزمایش

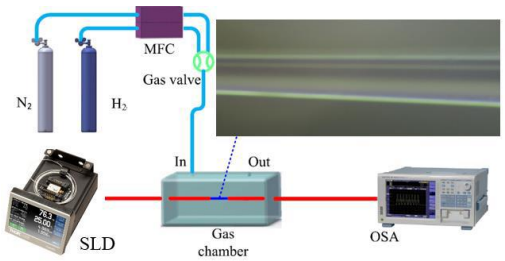
در این تحقیق ابتدا در سه مرحله نازک‌سازی فیبر، عکس‌برداری از فیبر نازک شده و لایه نشانی پالادیوم بر روی فیبر، حسگر فیبر نوری نازک شده ساخته شد. در مرحله اول روکش یک فیبر تک مد با نام تجاری smf28، با استفاده از یک روکش‌بردار برداشته شد و توسط دستمال اپتیکی و اتانول تمیز شد. سپس با استفاده از شعله بوتان و اکسیژن، نازک‌سازی فیبر نوری صورت گرفت. پس از نازک‌سازی، عکس‌برداری توسط یک عدسی (بزرگنمایی ۱۰ برابر) و دوربین عکاسی (بزرگنمایی ۶۴ برابر) از فیبرها انجام شد و در نهایت اطلاعات فیبرها از جمله طول، قطر و زاویه نازک شدگی توسط نرم افزار Image J ثبت گردید. سپس فیبرهای نازک‌شده با استفاده از دستگاه کندوپاش مغناطیسی رومیزی سه‌کاتده مدل DST3-A، با فشارپایه $۷/۵\times۱۰^{-۵}$ تور (فشار کاری $۵/۶\times۱۰^{-۲}$ تور)، ولتاژ ۳۴۴ ولت، آمپراژ ۱۱۰ میلی آمپر، توان ۳۸ کیلووات، زمان ۱۰۰ ثانیه و فلوی گاز آرگون ۳۱ sccm لایه‌نشانی شدند. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ضخامت لایه‌نشانی حدود ۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. جهت انجام آزمایش حسگری، فیبرهای لایه‌نشانی شده در محفظه‌های شیشه‌ای به قطر ۲/۵ میلیمتر و طول ۱۵ سانتیمتر قرار گرفتند. چیدمان آزمایش شامل منبع نوری پهن‌باند SLD (مدل SLD 1550S-A40 ساخت شرکت Thorlabs) با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر، پهنای طیفی حدود ۸۰ نانومتر و بیشینه توان ۴۰ میلی وات، محفظه جایگذاری حسگرهای

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

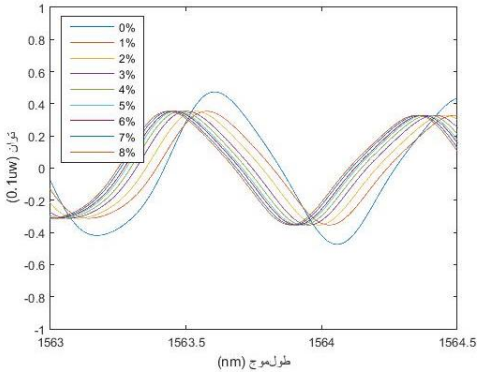
ساخته شده، دستگاه تحلیلگر طیفی[۱] (مدل B۲۰۳ ساخت شرکت Thorslab)، کپسول اکسیژن، کپسول نیتروژن، کنترل‌سنج شارجرمی[۲] و اتصال قفلی[۳] جهت اتصالات فیبری می‌باشد. فیبرهای نازک شده داخل این محفظه‌ها از یک طرف به منبع نور پهن‌باند و از طرفی دیگر به دستگاه تحلیل‌گر طیفی متصل شده است. همچنین ورودی گاز محفظه به دو کنترل‌کننده شار جرمی جهت کنترل میزان شارش گاز هیدروژن و نیتروژن (گاز حامل) متصل می‌شود. برای انجام آزمایش ابتدا منبع نور پهن‌باند در دما ۵۳/۶۴ درجه سانتیگراد و جریان ۸۵۲ میلی‌آمپر تنظیم شده و طیف نوری با خروج از یک فیبر نازک نشده توسط دستگاه تحلیلگر طیفی در دمای اتاق ثبت شد. سپس با اعمال درصدهای مختلف گاز هیدروژن از ۰ تا ۸ درصد، طیف نور خروجی مورد بررسی قرارگرفت.



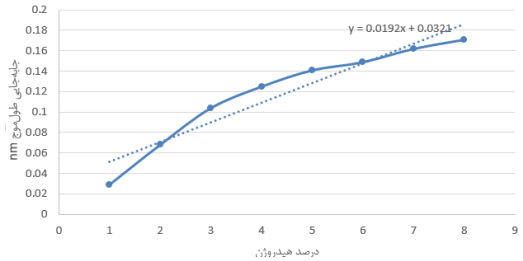

شکل ۲: چیدمان انجام آزمایش

## نتایج و تحلیل:

در این تحقیق ۳۲ عدد فیبر نوری تک مد به روش کشش و شعله نازک شد، که به دلیل حساسیت بالای فیبرها، تنها ۷ فیبر در پایان به مرحله آزمایش رسیدند. با ثبت طیف خروجی فیبر نوری نازک شده، طرح تداخلی حاصل از عبور نور منبع در این فیبرها مشاهده شد. طرح تداخلی حاصل به کمک نرم‌افزار متلب از طیف اصلی جدا و برای بازه کوچک ۱/۵ نانومتری به ازای هر درصد از گاز هیدروژن برای فیبر شماره ۱ در شکل (۳) رسم شده است. همچنین نمودار میزان جابجایی طول موجی برحسب درصد گاز هیدروژن برای فیبر شماره ۱ در شکل (۴) محاسبه و رسم شده است. با استفاده از این نمودار میزان حساسیت طیفی حسگر شماره ۱ مقدار $31\ pm/\%H_2$ محاسبه شد. برای سایر فیبرها میزان حساسیت طیفی مانند فیبر ۱ محاسبه و در جدول (۱)، ارائه شده است. منظور از حساسیت طیفی، مقدار تغییرات طول‌موج نسبت به تغییر ضریب‌شکست محیط اطراف به دلیل حضور غلظت‌های مختلف هیدروژن می‌باشد. با توجه به جدول (۱)، حساسیت طیفی حسگرهای ساخته شده تقریبا به طور یکسان تغییر می‌کنند. به عنوان نمونه برای حسگر ۲ و ۶ با قطر یکسان و زاویه نازک‌سازی متفاوت، حسگر ۲ به علت دارا بودن زاویه نازک‌سازی بیشتر دارای حساسیت طیفی بیشتری نسبت به حسگر ۶ است، چرا که در حسگر ۲، انتقال توان به مدهای مراتب بالاتر اتفاق افتاده و توان بیشتری در نزدیکی پالادیوم حرکت می‌کند، بنابراین تغییر ضریب شکست لایه پالادیوم تأثیر بیشتری بر نور خروجی از فیبر نوری می‌گذارد.




شکل ۳: نمودار جابه‌جایی طرح تداخلی فیبر ۱ برای غلظت ۰ تا 8 درصد هیدروژن




شکل ۴: نمودار میزان جابه‌جایی طول موج برحسب درصد هیدروژن

[۱] OSA
[۲] MFC
[۳] Fiber lock



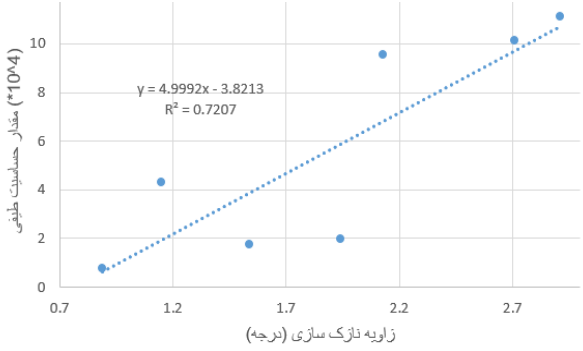
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

جدول ۱: نتایج خروجی آزمایش با فیبرهای مختلف

| شماره فیبر | قطر (میکرومتر) | میانگین زاویه(درجه) | حساسیت طیفی $\times 10^4 \frac{nm}{RIU}$ |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۲۴ | ۱/۹۴ | ۱/۹۷ |
| ۲ | ۲۳ | ۲/۹۱ | ۱۱/۷ |
| ۳ | ۱۸ | ۲/۱۳ | ۹/۵۷ |
| ۴ | ۲۰ | ۱/۵۴ | ۱/۷۴ |
| ۵ | ۱۸ | ۱/۱۵ | ۴/۳۱ |
| ۶ | ۲۳ | ۰/۸۹ | ۰/۷۸ |
| ۷ | ۲۲ | ۲/۷۱ | ۱۰/۱۲ |

در شکل (۵)، مقدار حساسیت طیفی برحسب زاویه نازک‌سازی رسم شده است. همانطور که مشخص است مقدار حساسیت با افزایش زاویه نازک‌سازی افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش قطر ناحیه نازک شده، مقدار حساسیت نسبتا افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش عمق نفوذ در لایه پالادیوم و تاثیر بیشتر تغییر ضریب شکست این لایه بر روی پرتو عبوری در فیبر نوری می‌باشد. تاثیر ضخامت لایه نشانی در میزان حساسیت حسگر نیز تفاوت عمق نفوذ میدان در داخل لایه جاذب می‌باشد، هنگامی که ضخامت لایه جاذب کمتر باشد، تغییرات ضریب شکست در نواحی نزدیک ناحیه نازک شده اتفاق افتاده و میدان میرا تحت تاثیر این تغییرات قرار می‌گیرد.




شکل ۵: مقدار حساسیت طیفی برحسب زاویه نازک‌سازی

## نتیجه‌گیری

میزان حساسیت به دست آمده به ازای درصدهای مختلف و پایین هیدروژن در این تحقیق نسبت به تحقیقات پیشین، نشان‌دهنده دقت و حساسیت بالای حسگرهای ساخته شده با لایه نشانی یک طرفه پالادیوم می‌باشد. با توجه به حساسیت به دست آمده و مقایسه با نتایج قبلی، ضخامت لایه جاذب به قطر ۲۰ نانومتر به عنوان مقدار بهینه به دست آمد. همچنین مشاهده شد فیبرهایی با زوایای نازک‌سازی بزرگتر و قطر ناحیه نازک‌شده کمتر، حساسیت بالاتری نسبت به هیدروژن دارا می‌باشند نتایج بدست آمده در مقایسه با کارهای قبلی بهبود پیدا کرده است[۸].

## مرجع‌ها

**[1]** A. M. Valadez, C. A. Lana, S. I. Tu, M. T. Morgan, "*Evanescent wave fiber optic biosensor for Salmonella detection in food*," Sensors, vol. 9, no. 7, pp. 5810–5824, (2009).

**[2]** J. D. Love and W. M. Henry, "*Quantifying loss minimisation in single-mode fiber tapers*," Electronics Letters, vol. 22, no. 17, pp. 912–914, (1986)..

**[3]** H.D. Zheng, J.Z. Ou, M.S. Strano, "*Nano structured tungsten oxide – properties: synthesis, and applications"*, Adv. Funct.Mater. 21 (12) (2011) 2175–2196.

**[4]** Zhang, Y.-n., et al.," *Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors*". Sensors and Actuators B: Chemical, ۲۰۱۷. ۲۴۴: p. ۳۹۳

**[5]** Hosoki, A., et al., "A surface plasmon resonance hydrogen sensor using Au/Ta۲O۵/Pd multi-layers on hetero-core optical fiber structures." Sensors and Actuators B Chemical ۲۰۱۳. ۱۸۵: p. ۵۸-۵۳

**[6]** J. Villatoro, A. Diez, J.L. Cruz, M.V. Aiidrts, "Highly sensitive optical hydrogen sensor using circular Pd-coated singlemode tapered fibre," Electron. Lett. 37 (16) (2001) 1011–1012.

**[7]** J. Villatoro, A. Diez, J.L. Cruz, M.V. Aiidrts, "Highly sensitive optical hydrogen sensor using circular Pd-coated singlemode tapered fibre," Electron. Lett. 37 (16) (2001) 1011–1012.

**[8]** Zhipeng Yu, L.J., Lipeng Sun, *Highly Sensitive Fiber Taper Interferometric Hydrogen Sensors*. IEEE Photonics Journal, ۲۰۱۶



این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]