

Investigation and Fabrication of a Palladium-Copper Composite Layer as an Adsorbent Layer of Tapered Fiber Optic Hydrogen Gas Sensor

M. Mohammadnejad, M. R. Zamani Meymian, M. Vahedi*

* Assistant Professor, Faculty of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

(Received: 10/08/2021; Accepted: 22/11/2021)

Abstract

In this research, the effect of an adsorbent layer on the hydrogen gas sensing of tapered optical fiber sensors has been investigated. First, the tapered optical fiber was prepared by heating and pulling a single mode optical fiber. Then, by applying the magnetic sputtering method, two samples of palladium and palladium-copper layers were deposited on one-side of the surface of the fiber as an adsorbent layer. The results of X-ray energy dispersion spectroscopy analysis (EDX) showed that the ratio of palladium to copper in the sample area is 97.53 to 2.47. The sensor operation tests for different percentages of hydrogen gas showed that the palladium-copper composite layer (Pd97.53Cu2.47) demonstrates lower sensitivity in comparison to the pure palladium layer. Typically, the percentage change in output power in the presence of 3% hydrogen gas was 3.38% for sensors with the palladium-copper adsorbent layer and 16.77% for sensors with the palladium adsorbent layer. But anyway the response of the composite layer in exposure to different hydrogen percentages is linear, in contrast to the pure palladium layer which shows a nonlinear behavior.

Keywords: Hydrogen Sensor, Tapered Optical Fiber, Optical Sensor, Fiber Sensor, Adsorbent Layer, Palladium-Copper, Magnetic Sputtering.

* Corresponding author E-mail: jkhalil@ihu.ac.ir

بررسی و ساخت لایه ترکیبی پالادیوم- مس به عنوان لایه جاذب حسگر گاز هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری نازک شده

محمد محمدنژاد^۱، محمدرضا زمانی میمیان^۲، محمد واحدی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳)

چکیده

در این پژوهش به بررسی تأثیر پارامتر لایه جاذب بر روی حساسیت حسگر گاز هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری نازک شده پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از فیبر نوری تک مد و با روش کشش و شعله، فیبر نوری نازک شده تهیه شد. سپس با استفاده از روش کندوپاش مغناطیسی دو نمونه لایه پالادیوم و پالادیوم- مس به عنوان لایه جاذب بر روی فیبرها به صورت یک طرفه لایه‌نشانی شد. نتایج آنالیز طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) نشان داد که درصد نسبت پالادیوم به مس در سطح نمونه ۹۷/۵۳ به ۲/۴۷ درصد است. انجام آزمایش حسگری برای درصدهای مختلف گاز هیدروژن نشان داد که لایه ترکیبی پالادیوم- مس ($Pd_{97.53}Cu_{2.47}$) به عنوان لایه جاذب حساسیت کمتری در مقایسه با لایه جاذب پالادیوم تنها دارد و به طور نوعی درصد تغییرات توان خروجی در حضور ۳ درصد گاز هیدروژن برای حسگرهایی با لایه جاذب پالادیوم- مس ۳/۳۸٪ و برای حسگرهایی با لایه جاذب پالادیوم ۱۶/۷۷٪ به دست آمد. اما در هر حال، تغییرات پاسخ لایه ترکیبی پالادیوم- مس بر خلاف لایه پالادیوم، نسبت به مقدار هیدروژن محیط خطی بود.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری قطعات، امواج الکترومغناطیس، شکست الکتریکی

۱- مقدمه

هیدروژن تاکنون حسگرهای مختلفی ساخته شده‌اند که دو دسته از مهم‌ترین این حسگرها حسگرهای الکتریکی و نوری می‌باشند. حسگرهای نوری در قیاس با حسگرهای الکتریکی بسیار ایمن‌تر هستند، چرا که بر خلاف حسگرهای الکتریکی باعث ایجاد جریان و جرقه الکتریکی و در نهایت انفجار در طی شناسایی گازهای قابل اشتعال نمی‌شوند. به تازگی، حسگرهای هیدروژن مبتنی بر فیبر نوری به دلیل حساسیت بالا و پاسخ زمانی سریع و ایمنی بیشتر به منظور کاربرد در انرژی پاک و صنعت هوافضا توسعه یافته‌اند.

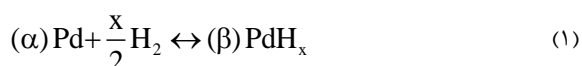
انواع مختلفی از حسگرهای فیبر نوری وجود دارد که حسگر فیبر نوری نازک شده یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. حسگر فیبر نوری نازک شده با استفاده از فیبرهای تک مد و یا چند مد، فیبرهای با ضریب شکست تناوبی، فیبرهای میکروساختار و یا انواع دیگر فیبر نوری ساخته می‌شود [۲ و ۳].

در حسگر فیبر نوری نازک شده، مشابه دیگر حسگرهای موجود، کمیت‌هایی وجود دارند که عملکرد حسگر با آن‌ها ارزیابی

امروزه گاز هیدروژن به عنوان یک منبع پاک و سازگار با محیط زیست در برخی از نقاط کره زمین به عنوان منبع سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گاز دارای چگالی کم ($0.0899 \frac{kg}{m^3}$)، نقطه جوش پایین ($20.39 K$) و به همراه ضریب انتشار و شناوری بالا در هوا ($0.61 \frac{cm^2}{s}$) است. این گاز از نظر خصوصیات احتراق، دارای انرژی احتراق پایین ($0.017 MJ$)، گرمای بالای احتراق ($142 \frac{KJ}{g}$) و همچنین سرعت احتراق بالا و دمای احتراق 560 درجه سلسیوس است. این گاز به عنوان یک گاز بدون رنگ، بدون بو و بدون مزه، توسط سامانه دفاعی بدن قابل تشخیص نبوده و برای اندازه‌گیری و تشخیص آن نیاز به ابزارهای سنجش دقیق است. تشخیص و اندازه‌گیری این گاز دارای قدمت بالای ۱۰۰ سال است [۱]. یکی از عمده مسائل و مشکلات این گاز، ذخیره‌سازی و حمل و نقل آن است که اگر با احتیاط حمل نشود و حدود ۴ درصد در محیط انتشار یابد، سبب انفجار مهیبی می‌شود. برای شناسایی گاز

نوری شامل تغییر در شدت، طول موج و یا فاز نور عبوری می باشد. بنابراین با اندازه گیری پارامترهای نور عبوری، می توان غلظت گاز هدف محیط را محاسبه کرد.

در حسگر فیبر نوری نازک شده برای تشخیص هیدروژن از لایه نشانی پالادیوم استفاده می شود. پالادیوم به عنوان یک واکنش دهنده با هیدروژن دارای خواص ویژه ای است. هنگامی که هیدروژن در نزدیکی لایه پالادیوم قرار می گیرد، هیدروژن مولکولی (H_2) با سرعت بالایی به هیدروژن اتمی (H) تبدیل می شود. سپس اتم های هیدروژن بر روی سطح لایه پالادیوم پخش شده و به سرعت به هیدرید پالادیوم (PdH_x) تبدیل می شوند (x نسبت اتمی H به Pd را نشان می دهد). همچنین هیدراسیون پالادیوم می تواند به عنوان یک انتقال فاز شبکه ای از فاز آلفا به بتا نیز تلقی شود (رابطه (۱)).



از نظر فیزیکی تغییر شبکه پالادیوم منجر به افزایش پارامتر شبکه آن می شود. در نتیجه حجم لایه پالادیوم (حتی تا ۹۰۰ برابر) گسترش یافته و ثابت شبکه آن کاهش می یابد [۵]. هر چه میزان هیدروژن محیط اطراف بیشتر شود، ثابت دی الکتریک لایه پالادیوم کاهش می یابد. رابطه میان غلظت هیدروژن و ثابت دی الکتریک پالادیوم به صورت رابطه (۲) است:

$$\epsilon_{Pd}(c) = h(c) \times \epsilon_{Pd}(0) \quad (2)$$

در رابطه (۲) $\epsilon_{Pd}(c)$ ثابت دی الکتریک لایه پالادیوم برای غلظت c از هیدروژن، $\epsilon_{Pd}(0)$ مقدار ثابت دی الکتریک لایه پالادیوم بدون هیدروژن که برابر ۳/۲۴ است و $h(c)$ یک تابع غیر خطی بر حسب غلظت هیدروژن است. میزان تابع $h(c)$ برای غلظت ۰ و ۴ درصد هیدروژن به ترتیب برابر ۱ و ۰/۸ است. همچنین نتایج نشان داده اند که قسمت حقیقی ثابت دی الکتریک لایه پالادیوم با افزایش هیدروژن کاهش می یابد [۶].

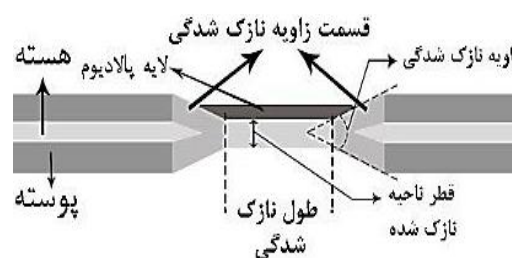
با لایه نشانی پالادیوم بر روی سطح فیبر نوری و تغییر میزان غلظت هیدروژن، حجم و ثابت دی الکتریک پالادیوم تغییر کرده و موجب تغییر در شدت تابش، طول موج و یا فاز پرتوهای عبوری می شود. اندازه گیری مقدار تغییر هر یک از این کمیت ها مقدار غلظت هیدروژن را مشخص می کند.

نموداری که در شکل (۲) آورده شده است، نشان دهنده حساسیت بسیار بالایی از پالادیوم نسبت به گاز هیدروژن در مقایسه با گازهای دیگر است (گزینش پذیری) [۷].

می شود. این کمیت ها موردی همچون؛ حساسیت^۱، زمان پاسخ^۲، زمان بازگشت^۳، حد تشخیص^۴، محدوده عملکرد^۵ و تکرارپذیری^۶ را شامل می شود. در ادامه حساسیت که مهم ترین پارامتر مورد بررسی در این تحقیق است، توضیح داده می شوند.

حساسیت: یکی از مهم ترین عوامل ارزیابی حسگرها میزان حساسیت آن ها در سنجش عامل مورد نظر است. مقدار حساسیت یک حسگر از تقسیم میزان تغییرات در مقادیر اندازه گیری شده در آزمایش، بر میزان تغییرات کمیت مورد اندازه گیری به دست می آید. به عنوان نمونه حساسیت در حسگر فیبر نوری نازک شده مبتنی بر شدت برای سنجش دما، به صورت نسبت میزان تغییرات توان بر میزان تغییرات دما بیان می شود.

در فیبر نوری استاندارد، شدت میدان موج در سطح خارجی (پوسته فیبر) تقریباً صفر است، بنابراین، انتشار نور در اینگونه فیبرها به محیط اطراف حساسیتی ندارد. برای ایجاد حساسیت فیبر نوری به محیط بیرونی، آن را به صورت نازک شده درمی آورند. با نازک کردن فیبر نوری به دلیل کاهش قطر فیبر نوری و افزایش گشودگی عددی^۷، مقدار عمق نفوذ و شدت میدان موج میرا می تواند به طور قابل توجهی زیاد شود [۲ و ۳]. این امر موجب می شود که خروجی به تغییرات ضریب شکست محیط اطراف حساسیت قابل توجهی نشان دهد. قسمت های مختلف یک حسگر فیبر نوری نازک شده در شکل (۱) نشان داده شده است. یکی از مهم ترین قسمت های آن، لایه جاذب است.



شکل (۱): قسمت های مختلف حسگر فیبر نوری نازک شده

عملکرد یک حسگر فیبر نوری نازک شده به پوشش حساس لایه نشانی شده (لایه جاذب) بر روی سطح فیبر نوری متکی است. در این شرایط هنگامی که غلظت گاز هدف (در این پژوهش گاز هیدروژن) محیط اطراف تغییر کند، ویژگی های فیزیکی و شیمیایی فیلم نازک تغییر کرده و این تغییرات، بر روی نور درون فیبر تأثیر می گذارد. تغییرات ویژگی نور داخل فیبر

¹ Sensitivity

² Response Time

³ Returning Time

⁴ Limit of Detection

⁵ Operating Range

⁶ Repeatability

⁷ Numerical Aperture-NA

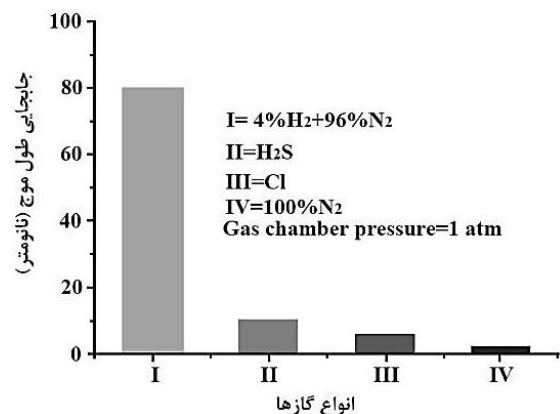
نمونه‌هایی با لایه جاذب پالادیوم تنها شد، ولی تغییرات پاسخ به درصدهای مختلف گاز هیدروژن برای Pd-Cu نسبت به پالادیوم تنها خطی بود. این حسگر به این دلیل که حساسیت در تمام نقاط اندازه‌گیری ثابت است، یک حسگر خطی است. سیگنال خروجی چنین حسگرهایی به‌طور خطی متناسب با میزان کمیت اندازه‌گیری شده می‌باشد. سپس حساسیت به‌صورت نسبت بین سیگنال خروجی و کمیت اندازه‌گیری شده، تعریف می‌شود. به‌عنوان مثال اگر یک حسگر، دما را اندازه‌گیری کند و تغییری در خروجی ولتاژ داشته باشد، حساسیت، یک عدد ثابت با یکای $[V/K]$ می‌باشد. خطی بودن پاسخ در حسگرها یک ویژگی مهمی می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد، تأثیر لایه ترکیبی پلاتین- مس بر روی حسگر مبتنی بر مقاومت (حسگر الکتریکی) گاز هیدروژن بررسی شده است، اما تاکنون تلاشی برای بررسی این لایه ترکیبی بر عملکرد حسگرهای نوری هیدروژن منتشر نشده است. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیر لایه ترکیبی بر عملکرد حسگرهای نوری هیدروژن است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا در سه مرحله نازک‌سازی فیبر، عکس‌برداری از فیبر نازک شده و لایه نشانی پالادیوم و پالادیوم- مس بر روی فیبر، حسگر فیبر نوری نازک شده انجام شد.

در مرحله اول روکش یک فیبر تک مد با نام تجاری smf28 بدون پوشش محافظ با استفاده از یک روکش بردار برداشته شد و توسط دستمال اپتیکی و اتانول تمیز شد. سپس فیبر نوری با استفاده از روش کشش و شعله (شعله بوتان و اکسیژن) نازک‌سازی شد. پس از نازک‌سازی و در مرحله دوم با استفاده از یک دوربین عکاسی با قدرت بزرگ‌نمایی ۶۴ برابر و یک عدسی شیئی با قدرت بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر (مجموع بزرگ‌نمایی ۶۴۰ برابر) عکس‌های مختلفی از قسمت‌های نازک شده فیبر گرفته شد. با تحلیل این تصاویر توسط نرم‌افزار Image J مشخصات اپتیکی فیبر نازک شده از جمله قطر ناحیه نازک شده، زاویه نازک‌شدگی و طول قسمت نازک‌شدگی به‌دست آمد. در مرحله آخر ساخت حسگر، پس از نازک‌سازی و عکس‌برداری از فیبرها، تعداد ۶۱ فیبر به دو دسته تقسیم شدند و بر روی ماسک‌های مخصوص لایه نشانی فیبرها قرار داده شدند. بر روی یک ماسک، لایه پالادیوم و بر روی ماسک دیگر لایه ترکیبی پالادیوم- مس لایه نشانی شد. شرایط این لایه نشانی‌ها مطابق با اطلاعات جدول (۲) است.



شکل (۲): جابه‌جایی طول موجی گازهای مختلف هنگام تماس با پالادیوم [۷]

در جدول (۱) برخی از مهم‌ترین موادی که در بهبود عملکرد حسگرهای فیبر نوری هیدروژن مبتنی بر شدت استفاده شده‌اند آورده شده است.

جدول (۱): برخی مواد استفاده شده به‌عنوان لایه

جاذب در حسگرهای هیدروژن فیبر نوری

مرجع	لایه جاذب
[۸ و ۹]	Pd
[۱۰]	Pd (Pt)/WO ₃
[۱۱ و ۱۲]	Pd/Y
[۱۳]	Pt/WO ₃
[۱۴]	Pd-capped Mg-Ti
[۱۵]	Ni-Pd
[۱۶]	Pt-WO ₃

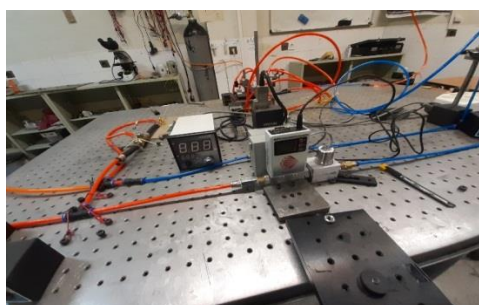
لو و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از Pt باعث افزایش حساسیت و طول عمر حسگر فیبر نوری هیدروژن می‌شود. تی مک و همکاران [۱۴] نشان دادند آلیاژ کردن لایه پالادیوم کاتالیزوری با مس به‌طور قابل توجهی عملکرد حسگر را در یک محیط روغن حاوی اکسیژن بهبود می‌بخشد.

می‌توان با استفاده از عناصر دیگر، خواص پالادیوم را برای آشکارسازی گاز هیدروژن بهبود بخشید، یکی از این عناصر فلز مس است. از مس و اکسیدهای آن برای کاربردهای حسگری استفاده می‌شود. از Cu و CuO برای بهبود پیک تشدید پلاسما سطحی و همچنین برای حسگری یا بهبود خواص حسگری حسگرهای گازی برای گازهای CO، H₂S، اتانول و سایر الکل‌ها و نیز H₂ استفاده شده است [۲۱-۱۷].

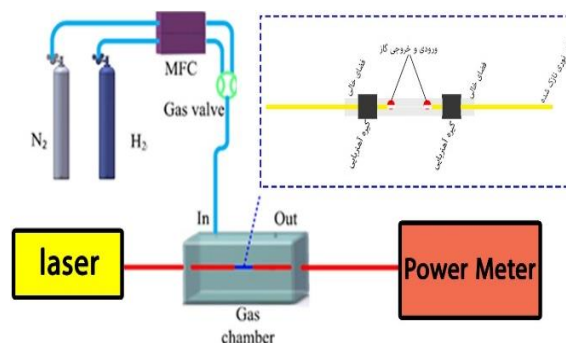
آیش [۱۸] نشان داد که استفاده از نانو کلاسترهای Pd-Cu به جای پالادیوم تنها، برای حسگر الکتریکی گاز هیدروژن (مبتنی بر تغییرات مقاومت) منجر به کاهش حساسیت نسبت به

جدول (۲): مشخصات لایه نشانی لایه پلادیوم و پالادیوم- مس بر روی فیبر نازک شده با روش کندوپاش مغناطیسی

جنس لایه	فشار پایه (10^{-5} Torr)	فشار کاری (10^{-2} Torr)	جریان آرگون (SCCM)	توان RF (W)	توان DC (W)	زمان لایه نشانی
Pd	۹/۵۷	۲/۸۵	۳۲	-	۴۰/۰۴	۱۰۰ ثانیه
Pd-Cu	۹/۵۵	۲/۹۲	۳۱	۱۵	۳۹/۲۷	۵۰ ثانیه



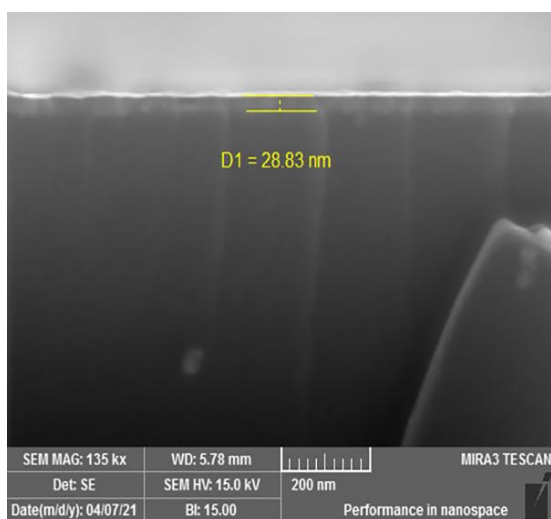
شکل (۴): تصویر چیدمان آزمایش



شکل (۳): شماتیک چیدمان انجام آزمایش

۵- نتایج و بحث

برای تعیین ضخامت لایه پالادیوم- مس آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)^۱ تهیه شد که مقدار ضخامت لایه پالادیوم- مس را ۸۲/۲۸ نانومتر نشان داد (شکل ۵). همچنین برای بررسی ماهیت ذرات تشکیل دهنده لایه جاذب از نمونه‌های پالادیوم- مس آنالیز طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس (EDX) از نمونه‌های پالادیوم- مس (دستگاه ساخت شرکت TES مدل vega2) گرفته شد که نتایج در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) ضخامت لایه پالادیوم- مس

چیدمان آزمایش بررسی حسگری حسگرهای فیبر نوری نازک شده در شکل (۳) به صورت شماتیک نشان داده شده است، همچنین در شکل (۴) تصویری از محیط آزمایش نشان داده شده است لیزر دیودی با طول موج مرکزی ۱۵۵۰ نانومتر به‌عنوان منبع نوری مورد استفاده قرار گرفت. لیزر فوق با استفاده از کنترل کننده دما و جریان در دمای ۲۰ درجه سلسیوس و جریان ۳۵ میلی‌آمپر راه‌اندازی شده است. خروجی این منبع نوری از طریق رابط FC/PC به رابط FC/PC، که از طریق فیوژن به یک سر حسگر متصل شده است، وصل می‌شود و پس از آن یک سر دیگر حسگر به همین طریق به ورودی توان‌سنج متصل می‌شود.

میزان ورودی گاز به داخل محفظه حسگر نیز توسط دو کنترل کننده شارش جرمی (MFC) کنترل می‌شود. این میزان برای گاز هیدروژن بین ۱ تا ۸ درصد می‌باشد و مقدار گاز نیتروژن به تناسب تنظیم می‌شود. ابتدا ۱۰۰ درصد گاز ورودی به محفظه

مخصوص حسگر گاز نیتروژن است (۱۰۰ درصد نیتروژن و ۰ درصد هیدروژن) در این حالت مقدار توان خروجی از حسگر از طریق توان‌سنج مشاهده و ثبت می‌شود. سپس با اعمال درصد‌های مختلف گاز هیدروژن (به‌عنوان مثال ۲ درصد هیدروژن و ۹۸ درصد نیتروژن) میزان تغییرات توان نسبت به حالت پایه (۱۰۰ درصد نیتروژن) مشاهده و ثبت می‌شود.

ضمناً کالیبراسیون MFC مربوط به گاز نیتروژن بر روی ۱۰۰۰ sccm تنظیم شده و این میزان برای MFC گاز هیدروژن برابر ۱۰۰۰ sccm می‌باشد.

^۱ Field Emission Scanning Electron Microscope

سپس آزمایش حسگری برای درصدهای مختلف گاز هیدروژن انجام شد. از بین ۶۱ فیبر لایه نشانی شده از تعداد ۷ فیبر (که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) آمده است) آزمایش حسگری گازی گرفته شد. بقیه فیبرها به دلایل زیر از کنار گذاشته شدند:

- شکسته شدن در حین جابه‌جایی‌ها؛
- نداشتن توان خروجی؛
- نداشتن حساسیت به گاز.

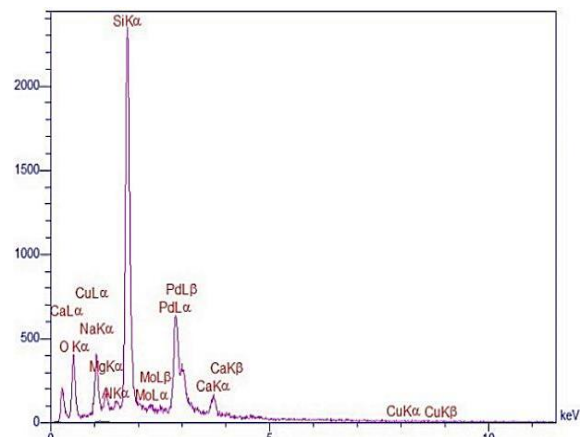
$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 (\Delta n)} \times 100 \quad (3)$$

برای هر فیبر نمودار درصد تغییرات توان بر حسب درصد هیدروژن محاسبه و رسم شده است (شکل (۷)). حساسیت از رابطه (۳) محاسبه می‌شود، در رابطه (۳) P_1 توان خروجی از فیبر قبل از ورود درصد خاص هیدروژن، P_2 توان خروجی از فیبر بعد از ورود درصد خاص هیدروژن است و Δn تغییرات ضریب شکست محیط است.

جدول (۳): مشخصات فیبرهایی که آزمایش حسگری روی آن‌ها انجام شده است

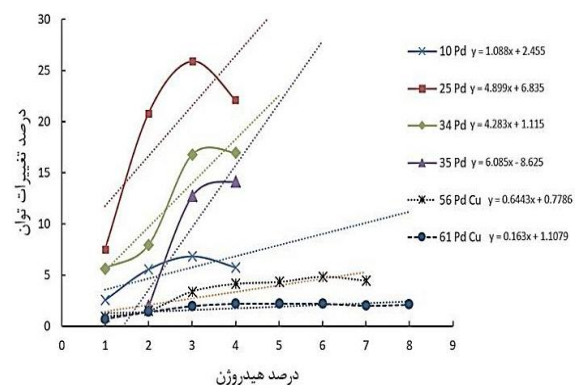
فیبر	جنس لایه جاذب	طول نازک شدگی (cm)	زاویه سمت راست (درجه)	زاویه سمت چپ	قطر ۱ μm	قطر ۲	قطر ۳
۱۰	Pd	۱/۲	۲/۲	۳/۴	۲۵	۲۴	۲۴
۱۳	Pd-Cu	۱/۱	۳	۲/۱	۱۴	۲۴	۲۴
۲۵	Pd	۱/۱	۲/۷	۲/۳	۲۳	۲۰	۱۳
۳۴	Pd	۱/۲	۴	۳/۱	۲۵	۲۱	۲۱
۳۵	Pd	۱/۳	۳/۹	۳/۸	۲۳	۲۹	۲۰
۵۶	Pd-Cu	۱/۴	۲/۴	۲/۳	۱۵	۲۸	۱۵
۶۱	Pd-Cu	۱/۲	۳/۴	۴	۲۲	۲۶	۱۷

حالی است که نمودار درصد تغییرات توان بر حسب غلظت گاز هیدروژن برای فیبرهای ۵۶ و ۶۱ که دارای لایه جاذب پالادیوم- مس هستند، با افزایش غلظت شکل خطی خود را تقریباً حفظ می‌کنند. اما همان‌طور که در این شکل مشخص است میزان درصد تغییرات توان برای فیبرهای با لایه جاذب پالادیوم تنها بیشتر از فیبرهای با لایه جاذب پالادیوم- مس است. برای هر ۶ فیبر شکل (۷) شیب تغییرات توان محاسبه شد. و همان‌طور که در شکل مشخص است شیب نمودارهای مربوط به فیبرهای بالای پالادیوم تک بیشتر از لایه ترکیبی است. همچنین فیبرهای با لایه جاذب پالادیوم- مس به درصدهای بالای هیدروژن پاسخ بهتری داده‌اند. در جدول (۴) درصد تغییرات توان برای ۳٪ هیدروژن و شیب نمودار برای فیبرها نشان داده شده است، در این جدول و نمودار شکل (۷)، کاهش درصد تغییرات توان و شیب نمودار برای نمونه‌های دارای لایه جاذب پالادیوم- مس نسبت به نمونه‌های دارای لایه جاذب پالادیوم تنها مشاهده می‌شود.



شکل (۶): نمودار طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس برای نمونه پالادیوم مس

نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که درصد پالادیوم موجود در سطح نسبت به درصد مس برای لایه ترکیبی ساخته شده میزان ۹۷/۵۳ درصد پالادیوم به ازای ۲/۴۷ درصد مس است، یعنی میزان مس موجود در سطح بسیار کم است.



شکل (۷): نمودار مقایسه درصد تغییرات توان فیبرهای تهیه شده برای درصدهای مختلف گاز هیدروژن

همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است فیبرهای شماره ۱۰، ۲۵، ۳۴ و ۳۶ که دارای لایه جاذب پالادیوم تنها هستند در بازه درصدهای هیدروژن ۱ تا ۳ درصد، دارای درصد تغییرات توان خطی هستند، اما با افزایش غلظت گاز هیدروژن نمودار تغییرات توان هر کدام از این ۴ فیبر از حالت خطی خارج می‌شود. این در

Resonance and Native Defects of Zinc Oxide by Palladium," Journal of Optics, vol. 18, p. 015004, 2015.

- [8] J. Villatoro, A. Diez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "Highly Sensitive Optical Hydrogen Sensor Using Circular Pd-Coated Singlemode Tapered Fibre," Electronics Letters, vol. 37, pp. 1011-1012, 2001.
- [9] S. Sekimoto, H. Nakagawa, S. Okazaki, K. Fukuda, S. Asakura, T. Shigemori and S. Takahashi, "A fiber-Optic Evanescent-Wave Hydrogen Gas Sensor Using Palladium-Supported Tungsten Oxide," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 66, pp. 142-145, 2000.
- [10] Y. Liu, Y. P. Chen, H. Song and G. Zhang, "Modeling Analysis and Experimental Study on the Optical Fiber Hydrogen Sensor Based on Pd-Y Alloy Thin Film," Review of Scientific Instruments, vol. 83, p. 075001, 2012.
- [11] Y. Liu and L. YanLi, "Signal Analysis and Processing Method of Transmission Optical Fiber Hydrogen Sensors with Multi-Layer Pd-Y Alloy Films," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, pp. 27151-27158, 2019.
- [12] Y. Liu and L. YanLi, "Signal Analysis and Processing Method of Transmission Optical Fiber Hydrogen Sensors with Multi-Layer Pd-Y Alloy Films," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 44, pp. 27151-27158, 2019.
- [13] T. Mak, R. J. Westerwaal, M. Slamán, H. Schreuders, A. W. Van Vugt, M. Victoria, C. Boelsma and B. Dam, "Optical Fiber Sensor for the Continuous Monitoring of Hydrogen in Oil," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 190, pp. 982-989, 2014.
- [14] K. S. Park, Y. H. Kim, J. B. Eom, S. J. Park, M. S. Park, J. H. Jang, and B. H. Lee, "Compact and Multiplexible Hydrogen Gas Sensor Assisted by Self-Referencing Technique," Optics express, vol. 19, pp. 18190-18198, 2011.
- [15] S. Tang, B. Zhang, Z. Li, J. Dai, G. Wang and M. Yang, "Self-Compensated Microstructure Fiber Optic Sensor to Detect High Hydrogen Concentration," Optics Express, vol. 23, pp. 22826-22835, 2015.
- [16] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang and R. Gao, "Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors," Sensors, vol. 10, 2088-2106, 2010.
- [17] A. I. Ayesh, "Linear Hydrogen Gas Sensors Based on Bimetallic Nano Clusters," Journal of Alloys and Compounds, vol. 689, pp. 1-5, 2016.
- [18] A. I. Ayesh, "Linear Hydrogen Gas Sensors Based on Bimetallic Nano Clusters," Journal of Alloys and Compounds, vol. 689, pp. 1-5, 2016.
- [19] R. P. Domingues, M. S. Rodrigues, C. Lopes, P. Pedrosa, E. Alves, N. P. Barradas, J. Borges and F. Vaz, "Thin Films Composed of Metal Nanoparticles (Au, Ag, and Cu) Dispersed in AlN: The Influence of Composition and Thermal Annealing on the Structure and Plasmonic

جدول (۴): درصد تغییرات توان برای ۳٪ هیدروژن برای ۷ فیبر

شماره فیبر	لایه جاذب	تغییرات توان برای ۳٪ هیدروژن	شیب نمودار در شکل (۸)
۱۰	Pd	۶/۸۴	۱/۰۸
۱۳	Pd-Cu	۲/۰۴	-
۲۵	Pd	۲۵/۱۹	۴/۸۹
۳۴	Pd	۱۶/۷۷	۴/۲۸
۳۵	Pd	۱۲/۷۲	۶/۰۸
۵۶	Pd-Cu	۳/۳۸	۰/۶۴۴
۶۱	Pd-Cu	۱/۹۶	۰/۱۶۳

۶- نتیجه گیری

نمونه‌های لایه نشانی شده Pd-Cu با وجود دستیابی به تغییرات توان خطی، حساسیت کمتری نسبت به هیدروژن برای حسگر فیبر نوری نازک شده نشان داده‌اند و این مشابه نتیجه‌ای است که آیش برای حسگر الکتریکی مبتنی بر تغییرات مقاومت به دست آورده است. منتها نتایج این تحقیق نشان می‌دهند حتی درصدهای بسیار کمتری از نتایج تحقیق آیش نیز می‌تواند باعث ایجاد پاسخ خطی شوند، همچنین همان‌طور که در نتایج تی مک ترکیب مس با پالادیوم باعث بهبود عملکرد حسگر نوری مبتنی بر شدت شده بود، در این پژوهش نیز باعث دستیابی به تغییرات توان خطی شد.

۵- مراجع

- [1] B. Wang, Y. Zhu, Y. Chen, H. Song, P. Huang, and D. V. Dao, "Hydrogen Sensor Based on Palladium-Yttrium Alloy Nanosheet," Materials Chemistry and Physics, vol. 194, pp. 231-235, 2017.
- [2] A. M. Valadez, C. A. Lana, S. I. Tu, M. T. Morgan, and A. K. Bhunia, "Evanescent Wave Fiber Optic Biosensor for Salmonella Detection in Food," Sensors, vol. 9, pp. 5810-5824, 2009.
- [3] J. D. Love and W. M. Henry, "Quantifying Loss Minimisation in Single-Mode Fiber Tapers," Electronics Letters, vol. 22, pp. 912-914, 1986.
- [4] Y. n. Zhang, H. Peng, X. Qian, Y. Zhang, G. An and Y. Zhao, "Recent Advancements in Optical Fiber Hydrogen Sensors," Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 244, p. 393, 2017.
- [5] A. Hosoki, M. Nishiyama, H. Igawa, A. Seki, Y. Choi and K. Watanabe, "A Surface Plasmon Resonance Hydrogen Sensor Using Au-Ta2O5/Pd Multi-Layers on Hetero-Core Optical Fiber Structures," Sensors and Actuators B Chemical 185: p. 53-58, 2013.
- [6] R. Tabassum and B. D. Gupta, "Fiber Optic Hydrogen Gas Sensor Utilizing Surface Plasmon Resonance and Native Defects of Zinc Oxide by Palladium," Journal of Optics, vol. 18, p. 015004, 2015.
- [7] R. Tabassum and B. D. Gupta, "Fiber Optic Hydrogen Gas Sensor Utilizing Surface Plasmon

- 11874, 2013.
- [21] R. Tabassum, K. M. Satyendra, and D. G. Banshi, "Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Hydrogen Supplied Gas Sensor Utilizing Cu-ZnO Thin Films," *Physical chemistry Chemical physics*, vol. 15, pp. 11868-11874, 2013.
- Response," *Thin Solid Films*, vol. 676, pp. 12-25, 2019.
- [20] R. Tabassum, K. M. Satyendra and D. G. Banshi, "Surface Plasmon Resonance-Based Fiber Optic Hydrogen Supplied Gas Sensor Utilizing Cu-ZnO Thin Films," *Physical chemistry Chemical physics*, vol. 15, pp. 11868-