

حسگری هیدروژن بر پایه بلور فوتونی با بررسی تغییرات ضریب شکست محیط

روح اله رمضانی، سیده مهری حمیدی، مجتبی شفیع، بابک شکری

تهران-اوین-ولنجک-دانشگاه شهید بهشتی-پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - با افزایش روزافزون استفاده از هیدروژن، به عنوان یک منبع سوخت تجدیدپذیر، نیاز به حسگرهای فوق حساس نیز در حال افزایش است. حسگرهای اپتیکی به دلیل حساسیت بالاتر، کاندیدهای خوبی در این زمینه شناخته شده اند که در این کار این نوع حسگرها با بهره گیری از ایجاد امواج سطحی بلندبرد در سطح بلور فوتونی و استفاده از پالادیوم به عنوان جاذب گاز هیدروژن ساخته و مشخصه یابی گردیده اند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر توانایی حسگری یک درصدی گاز هیدروژن در این حسگر می باشد. کلید واژه- حسگرهای هیدروژنی، امواج سطحی بلند برد، بلور فوتونی یک بعدی.

Study of the Change of Refractive Index in Hydrogen Sensors based on Photonic Crystal

Roholla Ramezani, Seyedeh Mehri Hamidi, Mojtaba Shafie, Babak Shokri

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract- The demand for high sensitive hydrogen sensors is growing by increased use of hydrogen as a renewable energy source. The optical sensors are suitable candidates due to their high sensitivity. In this paper, our fabricated optical sensor is characterized by making use of long range surface plasmon resonance on the surface of photonic crystal and also by benefiting from palladium as the hydrogen gas absorber. The results have shown the sensing capability of one percentage of hydrogen gas.

Keywords: Hydrogen gas sensors, Long range surface Plasmon resonance, one-dimensional photonic crystals.

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

مقدمه

با کاهش منابع سوختی، نیاز به یک منبع سوختی تجدید پذیر به شدت احساس می شود و این نیاز محققان را به سمت عنصری کوچک و فعال مانند هیدروژن سوق داد. اما این عنصر مفید با وجود کاربردهای متعدد به شدت قابل اشتعال بود و از اینرو محققین به دنبال روشهایی برای تشخیص نشتی این گاز بودند. حسگرهای متعددی مانند حسگرهای الکترونیکی [1]، حسگرهای شیمیایی [1] و حسگرهای اپتیکی [2] به روشهای مختلف برای تشخیص نشتی ساخته شدند. اما در این میان، حسگرهای اپتیکی از کارایی بهتری برخوردار بودند. از سوی دیگر، حسگرهای اپتیکی برپایه امواج پلاسمون سطحی بلند برد به دلیل کوتاه بودن مدت زمان حسگری، گوی سبقت را از دیگر حسگرها در زمینه ی حسگرگازی ربوده است. در این گزارش، حسگر هیدروژن برپایه تشدید پلاسمون سطحی بلند برد در سطح فلز پالادیم که توانایی جذب هیدروژن تا 399 برابر حجم خود را دارد، معرفی گردیده و مورد بررسی قرار گرفته است.

حسگر گازی برپایه پلاسمونهای سطحی بلند برد (LRSPP)^۱

پلاسمون-پلاریتونها ی سطحی (SPP^2) (امواج سطحی اپتیکی قطبش p می باشند که روی فصل مشترک فلز-دی الکتریک منتشر می شوند [۳]. فلزاتی مانند طلا و نقره بهترین مواد برای تحریک پلاسمونهای سطحی در طول موج مرئی می باشند، درحالی که فلزاتی با اتلاف بالا، مانند پالادیم در طول موج مرئی طول انتشار بسیار پایینی دارند [۴]. یک راه کار برای افزایش طول انتشار پلاسمونهای سطحی استفاده از امواج LRSPP، می باشد. در سال 1391 درور سرید^۳ بیان داشت که در صورت قرار دادن فیلم فلزی نازک بین دو دی الکتریک مشابه در هندسه کرشمن^۴، می توان طول انتشار را افزایش داد [۷-۵]. به عبارتی در هندسه کرشمن ساده طول انتشار در حدود 19 میکرومتر می باشد، در حالی که در حالت LRSPP، طول انتشار در محدود چند میلی متر قرار می گیرد.

همانطور که گفتیم برای استفاده از خواص امواج سطحی LRSPP، نیاز داریم که ضریب شکست در دو طرف فیلم نازک فلزی با یکدیگر برابر باشند. بنابراین برای حسگری محیطهایی با ضریب شکست مشابه هوا ($n=1$) مانند هیدروژن، نیاز داریم که ماده با ضریب شکست هوا در طرف دیگر فیلم نازک فلزی قرار دهیم، که در این صورت ما باید فیلم نازک فلزی را روی هوا به صورت معلق قرار دهیم، که چنین کاری امکان پذیر نبود. اما در سال ۱۹۹۶ والری کانپسکی^۵ از بلورهای فوتونی یک بعدی برای یکسان سازی ضریب شکست در طرف دیگر حسگر استفاده کرد [۸]. بلورهای فوتونی یک بعدی، چندلایه هایی ساده می باشند، که دارای یک باند ممنوعه نواری می باشند که انتشار امواج الکترومغناطیسی در این باند نواری ممنوع می باشد. با تغییر ضخامت این بلورهای فوتونی می توان LRSPPها را روی سطح فیلم نازک تحریک کرد. زمانی که طول موج تحریک ما در محدوده باند نواری قرار می گیرد، بر اثر شکست کاملی که در هر یک از سطوح اتفاق می افتد، یک موج میرا با تکانه بزرگتر در درون بلور فوتونی منتشر می شود و این باعث می شود که ما بتوانیم موج ورودی خود را که تکانه کوچکتری دارد با پلاسمونهای سطحی که تکانه بزرگتری دارند جفت نماییم و LRSPP را ایجاد کنیم.

ساختار لایه حسگری

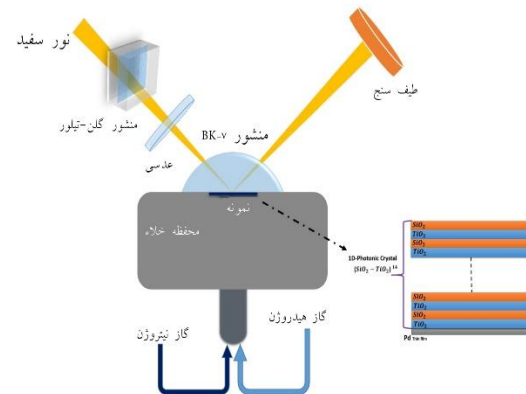
ساختار لایه حسگری ما شامل یک بلور فوتونی یک بعدی از دولایه ای (TiO_2/SiO_2) با هفت بار تکرار می باشد، که این بلور توسط لایه نشانی به روش تفنگ الکترونی بدست آمده است. پس از آن، لایه نازک پالادیم به ضخامت ۱۱ نانومتر به عنوان لایه جاذب گاز هیدروژن با کمک روش کندو پاش DC بر روی بلور فوتونی یک بعدی لایه نشانی شد.

برای بررسی عملکرد هسته حسگری خود، آن را در محفظه ساخته شده، در معرض درصدهای مختلف هیدروژن قرار دادیم، برای رساندن فشار محفظه به فشار اتمسفر، حجم خالی محفظه تا رسیدن به فشار اتمسفر با گاز نیتروژن پر می شود. سپس محفظه به همراه هسته

^۱ Long Range Surface Plasmon-Polariton
^۲ Surface Plasmon-Polariton
^۳ Dror Sarid
^۴ kretschmann configuration

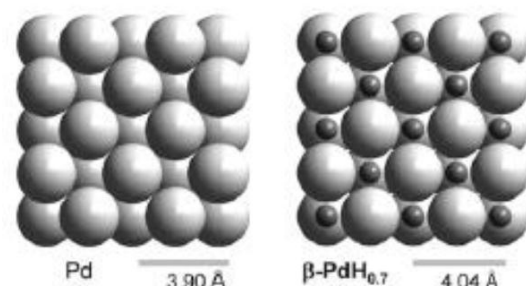
^۵ Valery N Konopsky
^۶ Electron-Gun

حسگری بر روی چیدمان آزمایشگاهی قرار می گیرد (شکل ۱).



شکل (۱) نمایی از چیدمان آزمایش حسگری هیدروژن.

پس از بررسی داده های به دست آمده با استفاده از آزمایش و با توجه به اینکه امواج LRSPP قادر به مشاهده تغییرات ضریب شکست محیط اطراف خود می باشند، تغییرات ضریب شکست محیط را مورد تحلیل و بررسی قرار دادیم. فلز پالادیم پس از جذب گاز هیدروژن اندازه ساختارش تغییر می کند (شکل ۲) و این تغییر ساختار باعث تغییر در ضرایب شکست فلز پالادیم می شود. از طرفی ضرایب شکست فلزات وابسته به طول موج می باشد و از سوی دیگر یک ماده پاشنده یعنی یک ماده که ضریب شکست آن وابسته به طول موج می باشد، باید جذب و در نتیجه یک ضریب جذب وابسته به طول موج داشته باشد. رابطه بین ضریب شکست و ضریب جذب یک نتیجه از روابط کرامرز-کرونیک می باشد. [۱۱].



شکل (۲) تورم پالادیم به علت انحلال هیدروژن [۱۰] ما برای بررسی تغییرات قسمت های موهومی و حقیقی تحت حضور درصد های مختلف هیدروژن روابط ۱ و ۲ را از روابط کرامرز-کرونیک بدست آوردیم [۹].

$$n(\omega) = (1 - R(\omega)) / (1 + R(\omega) - 2R(\omega)^{1/2} \cos(\theta(\omega))) \quad (1)$$

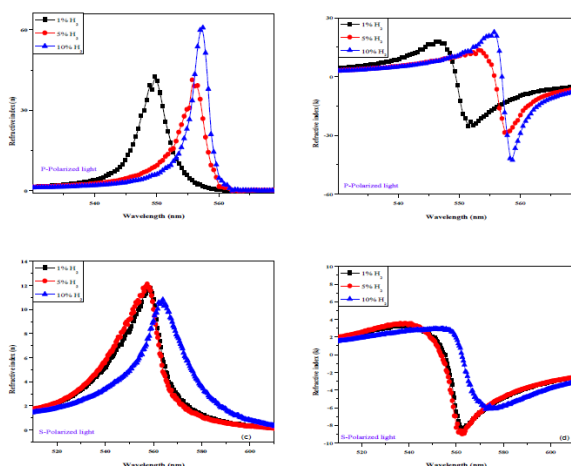
$$k(\omega) = 2R(\omega)^{1/2} \sin(\theta(\omega)) / (1 + R(\omega) - 2R(\omega)^{1/2} \cos(\theta(\omega))) \quad (2)$$

که در رابطه بالا $\theta(\omega)$ فاز ضریب بازتاب از نمونه می باشد که طبق رابطه کرامرز-کرونیک برابر است با:

$$\theta(\omega) = \frac{\omega}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\ln \frac{R(\eta)}{R(\omega)}}{\omega^2 - \eta^2} d\eta \quad (3)$$

در واقع ضریب بازتاب نمونه تحت شارش های مختلف گاز هیدروژن با کمک دستگاه طیف نگار ثبت گردیده و با استفاده از تغییرات ضریب بازتاب بر حسب فرکانس، فاز ضریب بازتاب و از آنجا بخش های حقیقی و موهومی ضریب شکست (طبق روابط ۱ و ۲) استخراج می گردند.

نتایج حاصل از این تحقیق از هسته حسگری به قرار شکل ۳ حاصل شد.

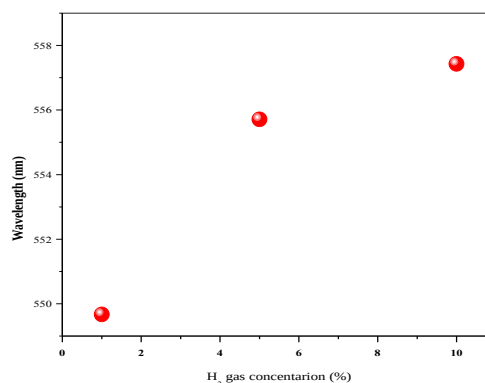


شکل (۳) مدولاسیون طول موجی برای قسمت های حقیقی و موهومی ضریب شکست هسته حسگری برای درصد های مختلف گاز H_2 به ازای دو قطبش S و P.

همانطور که در تصویر مشاهده می کنید برای قطبش P حسگر ما به خوبی تغییرات ضریب شکست را مشاهده می کند و این به دلیل عمق نفوذ بالای امواج LRSPP می باشد. در این حالت به ازای تغییر در شارش گاز هیدروژن، بخش های حقیقی و موهومی ضریب شکست متحمل جابجایی قمرز شده است.

مراجع

- [1] G. Korotcenkov, Handbook of Gas Sensor, springer press, (2000).
- [2] B. David and C. E. Tracy and H, Low-Cost, Fiber-Optic Hydrogen Gas Detector Using Guided-Wave, Surface-Plasmon Resonance in Chemochromic Thin Film ", Photonics East, International Society for Optics and Photonics ,51, 185 (1999).
- [3] H. Raether, Surface plasmons on smooth surfaces,, Springer, (1998).
- [4] V. N. K. Dmitry V Basmanov, Elena V Alieva, Dmitry I Dolgy, Eugeny D Olshansky, G. D " , Registration of long-range surface plasmon resonance by angle-scanning feedback and its implementation for optical hydrogen sensing ", New Journal of Physics , 11, 523 (1997).
- [5] D. D. Sarid " , "Long-range surface-plasma waves on very thin metal films" , Physical Review Letters, 26, 47 (2009).
- [6] V. N. Konopsky, "Plasmon polariton waves in nanofilms on one-dimensional photonic crystals", New journal of physics, 12, 093006 (2010).
- [7] Y. T. Fang, X. H. Song, L. Z. Lu, J. Wang, Y. Jiang, M. Zho, " surface waves with near zero or negative group velocity on one-dimensional photonic crystal coated with one metal film", Opt. Communications, 298, 129 (2013).
- [8] V. N. a. A. E. V. Konopsky " , "Long-range propagation of plasmon polaritons in a thin metal film on a one-dimensional photonic crystal surface ", Physical review letters, 94, 253904 (2006).
- [9] M. C. T. Bahaae, E. A. Saleh, Fundamentals of photonics, united states of america, wiley interscience, (2007).
- [10] G. Korotcenkov, Hand book of Gas Sensor Materials ,Springer, (2013).
- [11] J. Callaway " ,Quantum theory of the solid state ", Academic Press, 521 (1974).



شکل ۴: جابجایی طول موجی تشدید در قطبش P به ازای درصدهای مختلف گاز هیدروژن.

اما در قطبش S به علت عدم تحریک امواج پلاسمون سطحی این تغییرات به خوبی محسوس نیست، در درصدهای بالای هیدروژن به علت کوچک بودن سطح حسگری پالادیم و عدم توانایی در جذب بالاتر هیدروژن، تغییرات ضریب شکست برای قطبش P کمتر می شود و این در حالی است که در قطبش S امواج بلور فوتونی با افزایش درصد هیدروژن، حضور این گاز را نسبت به درصدهای پایین بهتر درک می کنند.

به بیان دیگر سهم های امواج سطحی بلور فوتونی و امواج پلاسمونی بلندبرد (LRSPR) به ترتیب در مورد قطبش های S و P نقش بازی می کنند.

در واقع عمق نفوذ امواج بلاخ که در قطبش S مشهود هستند بسیار کمتر از عمق نفوذ پلاسمونهای سطحی بلندبرد می باشد و در نتیجه به ازای درصدهای پایین تر گاز هیدروژن، نور با قطبش S قادر به حسگری بهینه نیست.

نتیجه گیری

همانطور که بیان داشتیم در حال حاضر حسگری هیدروژن بخش زیادی از مطالعات محققین را به خود اختصاص داده است، زیرا با کاهش منابع سوخت تجدیدناپذیر، هیدروژن منبع مناسبی برای جایگزینی می باشد. بنابراین ما توانستیم با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش، حسگری هیدروژن را با دقت خیلی خوب برای درصدهای مختلف از گاز هیدروژن مورد تحلیل و بررسی قرار دهیم. در حسگری هیدروژن علاوه بر مشخص نمودن میزان هیدروژن موجود در محیط، واکنش به درصدهای پایین هیدروژن مهمتر می باشد که، حسگر ما به خوبی توانست از عهده این کار بر بیاید.