بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۲-۱۴ بهمن ۱۴۰۰

حسگر گاز سولفید هیدروژن مبتنی بر فیبر بلور فوتونی

امین مولائی فرد ، دکتر جوادیان صراف و دکتر فرزان خطیب ، دکتر ابراهیم عطاران کاخکی

گروه مهندسی برق ، واحد مشهد ، دانشگاه آزاد اسلامی ، مشهد ، ایران

aminmolaeefard@yahoo.com

در این مقاله ، یک ساختار هندسی جدید برای یک فیبر کریستال فوتونیک به عنوان حسگر گاز سولفید هیدروژن طراحی شده است. حسگرهای گازی مبتنی بر PCF می توانند غلظت مواد شیمیایی مانند سولفید هیدروژن را تشخیص دهند. نتایج عددی نشان می دهد که استفاده از حفره های غیر دایره ای در اطراف حفره های حلقه مرکزی و تعداد بیشتر حفره های حلقه به ترتیب حساسیت و تلفات حبسی را بهبود می بخشد. طراحی ساختار هندسی به گونه ای است که برهم کنش نور و گاز در هسته فیبر را افزایش می دهد و باعث کاهش تلفات حبسی و افزایش حساسیت نسبی حسگر می شود .

محاسبه کلی با استفاده از روش المان محدود (FEM) با یک شرایط مرزی کاملاً منطبق شده (PML) تکمیل می شود.

نتایج بررسی شده حساسیت نسبی ۴۴,۵ درصد و تلفات حبسی $10^{-۱۴}$ × ۱,۲ دسی بل / سانتی متر در طول موج ۱,۵۵ میکرومتر را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: حسگر گاز ، فیبر کریستال فوتونیک ، حساسیت نسبی ، تلفات حبسی ، سولفید هیدروژن

Hydrogen Sulfide Gas Sensor Based On Photonic Crystal Fiber

Amin Molaee Fard[a], Mohammad Javadian Sarraf [1a], Farzan Khatib[a] Ebrahim Attaran kakhki[a]

[a] Department of Electrical Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran
Corresponding author. [1]
aminmolaeefard@yahoo.com

Abstract:In this paper, a new geometric structure is designed for a photonic crystal fiber as a hydrogen sulfide gas sensor. The PCF based gas sensors can detect the concentration of chemical material such as hydrogen sulfide .The geometric structure design is such that it enhances the interaction of light and gas in the fiber core and decreases the confinement loss and increases the relative sensitivity of the sensor.

The overall calculation is completed by using a finite element method (FEM) with a perfectly matched layer (PML) boundary condition. The investigated results reveal the relative sensitivity of %٤٧,٣٩٤ and confinement loss of ١,١×$10^{-٥}$ dB/cm at the 1.55µm wavelength.

Keywords: Gas sensor, PCF, relative sensitivity, confinement loss, hydrogen sulfide

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

مقدمه

تارهای بلور فوتونیک به دلیل ساختارهای خاص و قابلیت انعطاف، دارای ویژگی های مطلوبی برای حسگری هستند. تارهای بلورفوتونیک عمدتا به دو دسته تارهای "با هدایت ضریب شکست[۱] " و "هدایت شکاف نوار [۲]" تقسیم بندی می شوندکه عموما به ترتیب به صورت هسته توپر[۳] و توخالی[۴] هستند. تار با هسته توپر نیز همانند فیبرهای نوری معمولی از خاصیت انعکاس داخلی کلی استفاده می‌کند اما تارهای با هسته توخالی (مغزی تهی) که در حسگرهای مایعات و گازها کاربرد دارند به دلیل داشتن ضریب شکست پایین تر در ناحیه هسته، قادر به انتقال نور با خاصیت انعکاس داخلی کلی نیستند و برای آن ها از ویژگی هدایت شکاف نوار فوتونی استفاده می‌شود.

حسگرهای گازی تار بلور فوتونیک در محیط هایی که حاوی گازهای مخصوصی هستند و یا صنایعی که تولید گازهای خاصی می کنند کاربرد زیادی دارند؛ برای مثال در صنایع نظامی، متالورژی، ریخته‌گری، معادن، و نفت، گاز و پتروشیمی به کار گرفته می‌شوند. بنابراین تشخیص و حسگری گاز یکی از مهم ترین پارامترهای اندازه‌گیری است و نیازمند دقت، سرعت، قابلیت تشخیص گاز مورد نظر و میزان آن هاست که تمام این ویژگی ها توسط حسگرهای گازی تار بلور فوتونیک ارضا می‌شود. حفره هایی که در تارهای بلور فوتونیک به صورت سرتاسری وجود دارند، همانند مویرگ های ریزی هستند که موجب سهولت کنش و واکنش گاز با نور می شود که باعث کیفیـت بالای اندازه‌گیری می شود و این بزرگترین مزیت این حسگرهاست[۴].

ساختارهای مختلفی از بلورهای فوتونی به منظور حسگری گاز استفاده می شود که می توان به کاواک ها، تارها و موجبرهای بلور فوتونی به عنوان نمونه اشاره کرد. در این مقاله هدف بررسی ساختارهای مختلف تاربلور فوتونی با هدایت ضریب شکست و بهینه سازی ساختار برای بهبود حساسیت نسبی و تلفات حبسی است.

در حسگر های گازی تار بلور فوتونیک که با استفاده از خط جذب عمل می کنند، دو پارامتر مهم هستند که خصوصیات حسگر را بیان می کنند. این پارامتر ها عبارتند از حساسیت نسبی و تلفات حبسی. هرچه تلفات حبسی کمتر و حساسیت نسبی بیشتر باشد حسگر مطلوب ترخواهد بود[۵].

حساسیت نسبی مولفه ای در رابطه با شدت نور است که توسط آن می توان میزان تراکم گاز را اندازه گیری کرد .

روشی که معمولا برای حسگری گاز در این نوع از حسگرها استفاده می شود روش طیف سنجی جذبی[۵] است. روابط مهم زیر در این مورد برقرارند:

رابطه بیر-لامبرت

شدت نور ورودی و خروجی در یک محیط با قابلیت جذب با هم رابطه ای دارند. این رابطه توسط قانون بیر-لامبرت[۶]مطابق معادله (۱) بیان می‌شود.

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-r\alpha(\lambda)LC} \qquad (۱)$$

در این معادله $I(\lambda)$ بیانگر شدت نور خروجی با وجود گاز، $I_0(\lambda)$ شدت نور خروجی بدون حضور گاز، r حساسیت نسبی یا ضریب کاهش[۷][۱] محیط واسط (در اینجا تار)، α ضریب جذب گاز است که تابع طول موج است، L طول محیط و C میزان تراکم گاز است [۱]. نهایتا با داشتن پارامتر های فوق، میزان تراکم گاز (C) قابل محاسبه است.

---

[۱] Index Guiding Fiber
[۲] Bandgap Guiding Fiber
[۳] Solid-Core Photonic Crystal Fiber (SC-PCF)
[۴] Hollow-Core Photonic Crystal Fiber (HC-PCF)
[۵] Absorption spectroscopy
[۶] Beer-Lambert
[۷] Reduction Factor

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

حساسیت نسبی

در معادله بیر-لامبرت r که حساسیت نسبی تار است مطابق رابطه (2) تعریف می شود.

$$r = \frac{n_r}{n_e} f \qquad (2)$$

که در آن، n_r قسمت حقیقی ضریب شکست ماده ای است که قرار است سنجیده شود. برای گاز ها تقریبا برابر ۱ در نظر گرفته شده و n_e قسمت حقیقی ضریب شکست موثر مود هدایت شده است. در این رابطه f نسبت توان نوری منطقه نمونه [۲-۱] به توان کل است و مطابق معادله (۳) بیان می‌شود.

$$f = \frac{\int_{holes,\ core}(E_x H_y - E_y H_x)dxdy}{\int_{total}(E_x H_y - E_y H_x)\,dxdy} \qquad (3)$$

در حقیقت، حساسیت نسبی تار به ساختار تار و مواد به کار رفته در آن و طول موج نور ورودی وابسته است که در این مقاله قصد داریم با تغییر پارامترهای مختلف میزان تغییر حساسیت نسبی را تحلیل کنیم.

تلفات حبسی

با انتشار نور در داخل تار، قسمتی از انرژی میدان به داخل غلاف تار نشت می‌کند. این نوع اتلاف تلفات حبسی مد اصلی نامیده می‌شود.[۷]

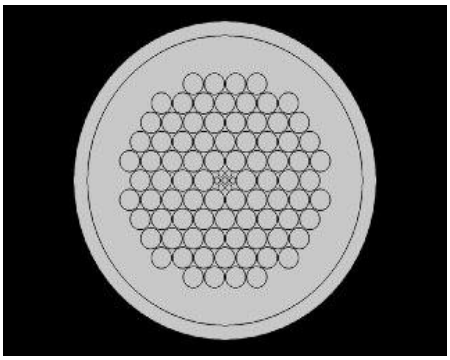
در صورتی که حفره های ناحیه پوشش نامحدود باشند، تلفات نشتی (یا حبسی) حذف می شود اما در عمل این امر غیر ممکن است و به دلیل این که حفره های هوایی موجود محدودند، تلفاتی تحت عنوان تلفات‌حبسی وجود خواهد داشت که از رابطه (۵) بدست می آید [۸-۳].

$$L_c = 8.686 k_0 Im[n_e] \qquad (۵)$$

در این رابطه $Im[n_e]$ قسمت موهومی ضریب شکست موثر، k_0 = $2\pi/\lambda$ عدد موج و L_c تلفات حبسی برحسب dB/m است.

در این قسمت ابتدا برای اطمینان از صحت شبیه سازی، طرح های مقاله اصلی را بررسی می کنیم و پس از آن با تغییر پارامترهای طراحی تار نظیر گام شبکه، قطر حفره ها و عرض هر یک از نواحی، اثر آن را بر حساسیت نسبی و تلفات حبسی بررسی می کنیم و نهایتا طرحی بهینه برای حسگر انتخاب کرده ایم.

همان طور که دیدیم با تغییر ساختار می توان حسگر گاز تار بلور فتونیک را بهبود بخشید. بر اساس یافته های قبلی همان طور که در مقاله علیایی و همکاران دیدیم [9] ما پیش بینی می کنیم با افزایش قطر حفره های حلقه های داخلی در طرح مقاله مرجع ما حساسیت نسبی افزایش یابد. همچنین ما انتظار داریم با تغییر قطر حفره های ناحیه هسته ، حفره های ناحیه پوشش ،گام شبکه ، ضریب شکست پس زمینه (ماده به کاررفته در تار) بتوانیم هر یک از مشخصه های تار اهم از حساسیت نسبی و تلفات حبسی را بهبود دهیم.



شکل شماره 1: ساختار پیشنهادی برای تار بلور فوتونی

در این جا با اعمال تغییرات مقالات قبل همچون ساختار هندسه حفره ها (شش ضلعی وهشت ضلعی) و ابعاد آن ها و پارامتر های گام شبکه(Λ) و ضریب شکست پس زمینه بر روی ساختار تار مرجع [9] و بهینه سازی هر یک از پارامتر های ساختار جدیدارائه دهیم که دارای حساسیت نسبی و تلفات حبسی مطلوب تری باشد.

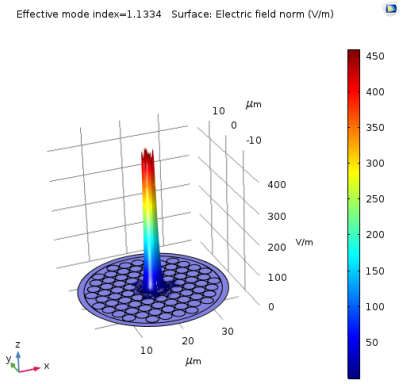
نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی می شود ساختارجدیدی برای حسگرگاز طراحی شود که به طور همزمان حساسیت نسبی را افزایش و تلفات حبسی را کاهش می دهد. شکل 1 ساختار پیشنهادی را نشان می دهد. که دارای پارامترهای قطر حفره های مرکزی d_m و سایرحفره ها d_1 و همچنین ثابت شبکه Λ است دراین ساختار ماده زمینه SIO_2 بوده ودرشبیه سازی نیز وابستگی ضریب شکست به طول موج نیز درنظرگرفته شده است اما دراکثرطرح های موجود درمقالات ضریب شکست را ثابت و برابر با n = 1/5در نظر گرفته اند که در نتیجه نتایج این مقالات دقیق نمی

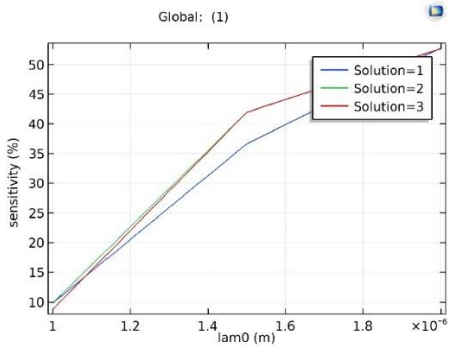
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

باشد درضمن برای ضریب شکست حفره ها برابربا یک است.درpcf پیشنهادی ثابت شبکه Λ=1/6 µm قطر و قطرحفره های حلقه ی درونی برابرd_1=1/52 µm و قطر حفره های مرکزی برابرd_m =0/45 µm درنظرگرفته شده است شکل یک توزیع شدت میدان مودپایه رانشان می دهد همان طورکه درشکل مشاهده می شود مود پایه درمرکز فیبر متمرکز بوده ودرنتیجه تلفات حبسی بسیارکم است .

دراین ساختارمی توان با افزایش نسبت قطر حفره ها به ثابت شبکه حساسیت نسبی را افزایش داد زیرا با کاهش ثابت شبکه کسرپرشدگی هوا درپوسته افزایش می یابد واین به معنی افزایش کسرتوان کلی درون حفره ها است. ازطرفی هرچه قطر حفره ی مرکزی کوچک ترباشد تلفات حبسی کمتراست زیراشاخص هسته تفاوت بیشتری باشاخص پوسته دارد و بیشتر توان نور درناحیه هسته محدودمی شود.امادراغلب موارد داشتن حساسیت بالا و تلفات حبسی به طورهمزمان مشکل است زیرا بهبود یکی سبب تخریب دیگری می شودوباید بین آن ها مصالحه ایجادکرد. [۶] نتایج بررسی شده حساسیت نسبی 44.5 درصد و تلفات حبسی$10^{-۱۴}$ × ۱,۲ دسی بل / سانتی متر در طول موج ۱,۵۵ میکرومتر را نشان می دهد.



شکل شماره ۲: شبیه سازی با نرم افزارکامسول با پارامتر های ذکر شده



شکل شماره ۳: نمودار حساسیت نسبی خروجی با نرم افزار کامسول

سپاسگزاری

در پایان جا دارد از شرکت پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد خانگیران و دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد که از این مقاله علمی-پژوهشی حمایت کرده است نهایت سپاسگزاری را انجام بدهیم.

مرجع‌ها

[1] S.G. Johnson."Photonic Crystals: From Theory to Practice." Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute ofTechnology(MIT), U.S.A. 2001.

[2] Y. L. Hoo, W. Jin, Ch. Shi, H. L. Ho, D. N. Wang, and Sh. C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor,"*Appl. Opt.*, vol. 42, pp. 3509-3515, 2003

[3] J. Park,S. Lee,S. Kim,and K. Oh, "Enhancement of chemical sensing capability in a photonic crystal fiber with a hollow high index ring defect at the center," *Optics Express*, vol. 19, No. 3, 2011.

[۴] هادی ابراهیم فتح آبادی ،مدیر برنامه ریزی تلفیقی شرکت ملی نفت ایران "مدیریت ناشی از خوردگی ناشی از گوگرد و هیدروژن سولفید" ، ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز ایران،شماره ۱۰۹، ۱۳۹۲.

[5] *F. Poli, A. CucinottaAnd S. Selleri. Photonic Crystal Fibers Properties and Applications*, Netherlands: *Springer, 2007.*

[6] M. Morshed, Md. Imran Hasan, and S. M. AbdurRazzak, "Enhancement of the Sensitivity of Gas Sensor Based on Microstructure Optical Fiber," Photonic Sensors, vol. 5, No. 4, pp. 312–320, 2015.

[7] C. Sibilia, T.M. Benson, M. Marciniak and T. Szoplik. Photonic Crystals: Physics and Technology, Italy: Springer, 2008.

[8] S. Olyaee, A. Naraghi and V. Ahmadi, "High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring," *Optik - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 125, pp. 596-600, Jan. 2014.

[9] S. Olyaee, H. Arman, and A. Naraghi, "Design, simulation, and optimization of acetylene gas sensor using hollow-core photonic bandgap fiber," *Sensor Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 387-392, 2015.

[10] L. Bagio, "Finite element modeling of electrochemical biosensors," California State University, Northridge, 2019.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]