



بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی



طراحی و تحلیل حسگر گاز مبتنی بر فیبر کریستال نوری با ضریب حساسیت نسبی بالا

رضا محمدی، مریم پورمحمی آبادی

گروه برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ایمیل: reza_mohammadi551@yahoo.com

چکیده - در این مقاله، طرح جدیدی برای حسگر گاز مبتنی بر فیبر کریستال نوری با ساختار چندگانه، ارائه می‌شود. تلفات تحدید و حساسیت نسبی حسگر، به پارامترهای ساختاری فیبر و طول موج وابسته است که به کمک روش تفاضل محدود در حوزه فرکانس (FDFD)، بدست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از ساختار چندگانه و افزایش نسبت قطر حفره‌های حلقه‌های بیرونی به ثابت شبکه، می‌توان همزمان به حساسیت نسبی بهتر و تلفات تحدید بسیار کمتر دست یافت. طرح پیشنهادی دارای حساسیت نسبی ۵۸٪ و تلفات تحدید بسیار کم در حد 2.3446×10^{-9} dB/m در طول موج $1.5 \mu m$ می‌باشد که خود حاکی از برتری این طرح نسبت به طرح‌های موجود است.

کلید واژه - تلفات تحدید، حسگر گاز، حساسیت نسبی، فیبر کریستال نوری.

Design and Analysis of Photonic Crystal Fiber Gas Sensor with High Relative Sensitivity

Reza Mohammadi, Maryam Pourmahyabadi

Department of Electrical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

reza_mohammadi551@yahoo.com

Abstract- In this paper, a novel gas sensor design based on hybrid photonic crystal fiber structure is presented. Confinement loss and relative sensitivity of sensor are dependent to fiber structural parameters and operation wavelength which are achieved here by Finite Difference Frequency Domain (FDFD) method. The simulation results revealed that the high relative sensitivity and ultra- low confinement loss can be achieved simultaneously by using hybrid photonic crystal fiber structure and increasing the ratio of the air-holes radius of the outer rings to the pitch. The proposed design presents the relative sensitivity of 58% and the confinement loss of 2.3446×10^{-9} dB/m at $1.5 \mu m$ wavelength which shows the superior performance of this design in comparison to the other existing designs.

Keywords: Confinement loss, Gas sensor, Relative Sensitivity, Photonic crystal fiber.

۱- مقدمه

بصورت زیر بدست می‌آید،

$$n_{eff} = \beta(\lambda, n_m(\lambda)) / k_0 \quad (۳)$$

که در آن K_0 عدد موج در فضای آزاد است. لازم به ذکر است که وابستگی ضریب شکست ماده به طول موج توسط رابطه سلمیر (۴)، محاسبه شده و در معادلات فوق استفاده می‌شود [5].

$$n_m^2(\lambda) = 1 + \frac{0.6837\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00460353} + \frac{0.420324\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0133969} + \frac{0.585027\lambda^2}{\lambda^2 - 64.4933} \quad (۴)$$

یکی از پارامترهای مورد استفاده در طراحی فیبر کریستال نوری، تلفات ناشی یا تلفات تحدید است. تلفات تحدید L_c ، که دسی بل بر متر است برابر است با [6]:

$$L_c = 8.686 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{eff}) \quad (۵)$$

که در آن، $\text{Im}[n_{eff}]$ قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر است. اگر تفاوت بین ضرایب شکست هسته و پوسته با وجود حفره هوای مرکزی کم شود، تلفات تحدید قابل توجه است. میدان میراشونده در حفره‌های هوا، توسط گاز جذب می‌شود. بدین ترتیب، غلظت گاز را می‌توان بواسطه شدت از طریق قانون بیر-لم برت بدست آورد [6,7]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-r \alpha_m(\lambda) l c] \quad (6)$$

که در آن I شدت نور خروجی در حضور گاز، I_0 شدت نور خروجی بدون حضور گاز است. همچنین α_m تابعی از طول موج ضریب جذب در گاز، l طول فیبر کریستال نوری مورد استفاده برای تشخیص گاز و c غلظت گاز است. ضریب حساسیت نسبی نیز طبق رابطه زیر تعریف می‌شود [6,7]:

$$r = \frac{n_r}{n_{eff}} f \quad (7)$$

که در آن n_r نزدیک به یک است و اشاره به ضریب شکست گازهای گوناگون دارد. پارامتر f نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود، [6,7].

فیبرهای کریستال نوری (PCF) ساختارهای جدیدی از موجبرهای نوری هستند که در سال‌های اخیر توجه محققین را به خود معطوف کرده‌اند. اخیرا به دلیل مزایا و ویژگی منحصر به فرد این گونه فیبرها، محققین آنها را در کاربردهای متنوعی از جمله طراحی حسگر، طراحی ادوات نوری برای کاربرد در مخابرات نوری و ادوات نظامی پیشنهاد می‌دهند [1]. برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد فیبرهای کریستال نوری شامل تک مودی در محدوده وسیعی از طول موجها، ضریب غیر خطی بالا، ضریب دوشکستگی بالا، پاشندگی رنگی قابل کنترل، حساسیت نسبی، تلفات تحدید و غیره است [2]. در این فیبرها، تغییر ویژگی‌های ساختار مانند تغییر قطر، شکل و فاصله بین حفره‌ها، امکان کنترل بهتر خصوصیات مانند حساسیت و تلفات را فراهم می‌آورد. اما در اغلب موارد داشتن این دو خصوصیت به طور همزمان مشکل است، لذا در این مقاله، یک حسگر گاز مبتنی بر ساختار فیبر کریستال نوری معرفی شده است که در آن جهت کاهش تلفات تحدید و افزایش حساسیت نسبی از ساختار هیبرید استفاده شده و پارامترهای آن (قطر حفره‌ها d و ثابت شبکه a) بهینه سازی می‌شوند.

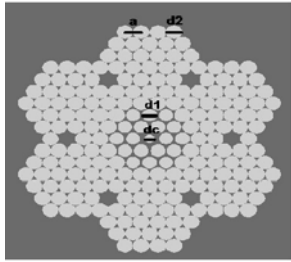
۲- تحلیل فیبر کریستال نوری با FDFD

تحلیل ساختارهای کریستال نوری توسط روشهای عددی نظیر FDFD انجام می‌شود. این روش بر پایه حل مستقیم معادلات ماکسول استوار است. معادلات ماکسول، پس از عملیات جبری و ساده‌سازی به صورت معادلات ماتریسی با مقادیر ویژه، در می‌آیند [3,4].

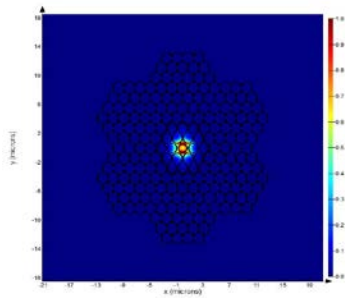
$$P \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$Q \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \beta^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (۲)$$

که در آن E_x و E_y مؤلفه‌های میدان الکتریکی و H_x و H_y مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در راستای محورهای x و y هستند. با اعمال شرایط مرزی PML در روش FDFD و با حل یکی از معادلات (۱) و (۲)، ثابت انتشار $\beta(\lambda, n_m(\lambda))$ و سپس ضریب شکست مؤثر



(الف)

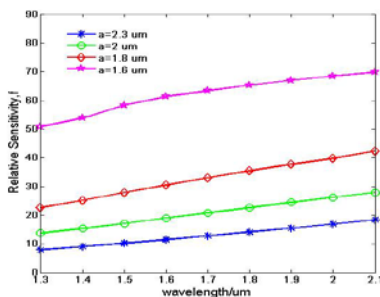


(ب)

شکل ۱: الف- فیبر کریستال نوری پیشنهادی با $d_2 = 1/6 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1/4 \mu\text{m}$ ، $d_c = 1/2 \mu\text{m}$ و $a = 1/6 \mu\text{m}$. ب- توزیع شدت میدان مود پایه.

۴- نتایج شبیه سازی

طرح پیشنهادی با استفاده از روش FDFD شبیه سازی شده است. شکل ۲، تأثیر افزایش نسبت قطر حفره‌ها به ثابت شبکه (با تغییر ثابت شبکه و ثابت نگه داشتن قطر حفره‌های هوا) برای PCF پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با کاهش a ، به دلیل افزایش کسر پر شدگی هوا در پوسته، میزان حساسیت نسبی نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش طول موج، به دلیل افزایش توان نور نفوذی به درون حفره‌های پوسته، حساسیت نسبی افزایش می‌یابد.



شکل ۲: نمودار حساسیت نسبی بر حسب طول موج برای PCF پیشنهادی با $d_2 = 1/6 \mu\text{m}$ ، $d_1 = 1/4 \mu\text{m}$ ، $d_c = 1/2 \mu\text{m}$ و $a = 2/3 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m}, 1/8 \mu\text{m}, 1/6 \mu\text{m}$

$$f = \frac{\int_{holes} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_{total} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy} \quad (8)$$

که در آن میدان‌های عرضی الکتریکی و مغناطیسی مود هدایت، به ترتیب با E_x, E_y و H_x, H_y معرفی شده‌اند.

۳- ساختار پیشنهادی

در این مقاله ساختار جدیدی برای حسگر گاز طراحی شده است که به طور همزمان حساسیت نسبی را افزایش و تلفات تعیین را کاهش می‌دهد. شکل ۱-الف، ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد، که دارای پارامترهای قطر حفره مرکزی d_c ، قطر حفره‌های بیرونی تر d_2 ، و قطر سایر حفره‌ها d_1 و همچنین ثابت شبکه a است. در این ساختار، ماده زمینه SiO_2 بوده و در شبیه‌سازی نیز وابستگی ضریب شکست به طول موج، نیز در نظر گرفته شده است، اما در اکثر طرح‌های موجود در مقالات، ضریب شکست را ثابت و برابر با $n=1/5$ در نظر گرفته‌اند که در نتیجه، نتایج این مقالات دقیق نمی‌باشد. در ضمن برای ضریب شکست حفره‌ها، برابر ۱ است. در PCF پیشنهادی، ثابت شبکه $a = 1/6 \mu\text{m}$ ، قطر حفره‌های ۷ حلقه آخر برابر $d_2 = 1/6 \mu\text{m}$ ، قطر حفره‌های دو حلقه درونی برابر $d_1 = 1/4 \mu\text{m}$ و قطر حفره مرکزی برابر $d_c = 1/2 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. شکل ۱-ب، توزیع شدت میدان مود پایه را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، مود پایه در مرکز فیبر متمرکز بوده و در نتیجه تلفات تعیین بسیار کم است.

در این ساختار، می‌توان با افزایش نسبت قطر حفره‌ها به ثابت شبکه، حساسیت نسبی را افزایش داد، زیرا با کاهش ثابت شبکه، کسر پر شدگی هوا در پوسته افزایش می‌یابد و این به معنی افزایش کسر توان کلی درون حفره‌ها است. از طرفی هر چه قطر حفره مرکزی کوچکتر باشد، تلفات تعیین کمتر است، زیرا شاخص هسته تفاوت بیشتری با شاخص پوسته دارد و بیشتر توان نور، در ناحیه هسته محدود می‌شود. اما در اغلب موارد داشتن حساسیت بالا و تلفات تعیین کم به طور همزمان مشکل است، زیرا بهبود یکی سبب تخریب دیگری می‌شود و باید بین آنها مصالحه ایجاد کرد.

طرح پیشنهادی با حساسیت نسبی 58٪ و تلفات تعیین
 $2/3446 \times 10^{-9}$ dB/m می‌باشد که حاکی از برتری
 کیفیت این طرح نسبت به طرح‌های موجود است.

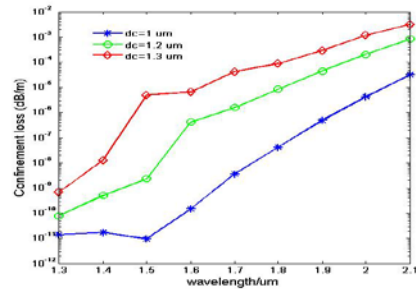
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ساختار جدیدی برای حسگر گاز مبتنی بر
 ساختار هیبریدی فیبر کریستال نوری، ارائه و وابستگی
 حساسیت نسبی و تلفات تعیین به پارامترهای فیبر و
 طول موج بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌-
 دهد که با کاهش ثابت شبکه، حساسیت نسبی افزایش و
 با افزایش قطر حفره مرکزی، تلفات تعیین و حساسیت
 نسبی افزایش می‌یابد. در نتیجه برای جبران تلفات
 تعیین، قطر حفره‌های بیرونی را افزایش می‌دهیم که تاثیر
 چندانی روی حساسیت نسبی ندارد، اما تلفات تعیین را
 به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. طرح پیشنهادی
 دارای حساسیت نسبی 58٪ و تلفات تعیین بسیار کم در
 حد $2/3446 \times 10^{-9}$ dB/m در طول موج $1/5 \mu m$
 می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که این طرح در
 قیاس با طرح‌های دیگر، از ویژگی‌های بهتر و مطلوب تر،
 برخوردار است.

۶- مراجع

- [1] J. M. Dudley, G. Genty, and S. Coen, "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber," *Reviews of modern physics*, vol. 78, p. 1135, 2006
- [2] J. Knight, T. Birks, P. S. J. Russell, and D. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Optics letters*, vol. 21, pp. 1547-1549, 1996
- [3] Z. Zhu and T. Brown, "Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers," *Optics Express*, vol. 10, pp. 853-864, 2002
- [4] W. Crutchfield, H. Cheng, and L. Greengard, "Sensitivity analysis of photonic crystal fiber," *Optics express*, vol. 12, pp. 4220-4226, 2004
- [5] Volkmar Brückner, "To the use of Sellmeier formula", Germany
- [6] 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, pp. 1921-1929, 2011
- [7] Y. L. Hoo, W. Jin, C. Shi, H. L. Ho, D. N. Wang, and S. C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor," *Applied Optics*, vol. 42, pp. 3509-3515, 2003
- [8] Z. Zhi-guo, Z. Fang-di, Z. Min, and Y. Pei-da, "Gas sensing properties of index-guided PCF with air-core," *Optics & Laser Technology*, vol. 40, pp. 167-174, 2008
- [9] S. Olyae, 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-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 125, pp. 596-600, 2014
- [10] S. Olyae and A. Naraghi, "Design and optimization of index-guiding photonic crystal fiber gas sensor," *Photonic Sensors*, vol. 3, pp. 131-136, 2013.

شکل ۳، نمودار تلفات تعیین بر حسب طول موج نسبت
 به تغییر قطر حفره مرکزی، را نشان می‌دهد. هر چه قطر
 حفره مرکزی کوچکتر باشد، تلفات تعیین نیز کمتر است،
 زیرا شاخص هسته تفاوت بیشتری با شاخص پوسته دارد و
 بیشتر توان نور در ناحیه هسته محدود می‌شود.



شکل ۳: نمودار تلفات تعیین بر حسب طول موج
 برای PCF پیشنهادی با $a=1/6 \mu m$ و $d_2=1/6 \mu m$
 و $d_1=1/4 \mu m$ و قطر هسته $d_c=1/3 \mu m, 1/2 \mu m, 1 \mu m$
 جدول ۱: مقایسه خصوصیات PCF پیشنهادی با طرح‌های موجود
 در طول موج $1/5 \mu m$ و مقادیر متوسط در محدوده طول موج $1 \mu m$
 الی $2/1 \mu m$

مرجع	طول موج λ (μm)	حساسیت نسبی (%)	تلفات تعیین (dB/m)
[8]	1/5	35	
	متوسط	41/22	
[6]	1/5	5	0/753
	متوسط	6/98	75/14
[9]	1/5	17	9×10^{-9}
	متوسط	21/72	0/2112
[10]	1/5	48	$1/255 \times 10^{-8}$
	متوسط	52/44	$2/33 \times 10^{-4}$
طرح پیشنهادی	$1/5 \mu m$	58	$2/3446 \times 10^{-9}$
	متوسط	61/99	$1/2234 \times 10^{-4}$

جدول ۱، مقایسه خصوصیات فیبر کریستال نوری
 پیشنهادی و برخی از طرح‌های موجود را نشان می‌دهد.
 نتایج مقایسه نشان می‌دهد، بیشترین حساسیت نسبی و
 کمترین تلفات تعیین در طول موج $1/5 \mu m$ مربوط به