



اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبر نوری - ۶ آبان ۱۴۰۰

ICOFS 2021

پژوهشکده لیزر و پلاسمای
1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors
October 28, 2021



شبیه سازی حسگر شیمیایی بر پایه ساختار فیبر بلور فوتونی نقص دار

محمد قهرمانی مقدم^۱، احمد رضا دارائی^{۱*}، محمد مهدی باباخانی فرد^۲، محمد اسماعیل زیبائی^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده: در این مقاله، یک حسگر شیمیایی مبتنی بر ساختار یک فیبر بلور فوتونی نقص دار طراحی و شبیه سازی شده است. نتایج محاسباتی بر پایه روش المان محدود نشان می دهند که هندسه ساختار حسگر پیشنهادی قادر است مد منتخب و مطلوب حسگری مواد شیمیایی، با آنالیت اتانول، را در سطح بسیار کوچک $0.4 \mu\text{m}^2$ با حساسیت فوق العاده بزرگ S-1550 nm/RIU شناسایی کند. هندسه ساختار، ضمن محبوب سازی مدهایی با حجم مدل بسیار کوچک $V_{\text{mode}}=0.0005(\lambda/n_{\text{SiO}_2})^3$ در ناحیه نقص، اتلاف نوری را به شدت کاهش داده و با تشدید آن، فاکتور کیفیت بسیار بالای $Q=3.1\times 10^8$ را ارائه می دهد. علاوه بر این، ساختار مدهایی را با دامنه میرا شونده به اندازه کافی بزرگ، پشتیبانی نموده و زمینه را برای استفاده از آن برای حسگری مواد شیمیایی بر پایه تغییرات ضربی شکست، فراهم آورده است.

کلید واژگان: فیبر نوری؛ بلور فوتونی نقص دار؛ حسگری ضربی شکست؛ فاکتور کیفیت.

Simulation of a Chemical Sensor based on the Defective Photonic Crystal Fiber Structure

Mohammad Ghahremani Moghadam¹, Ahmadreza Daraei^{1,*}, Mohammad-Mahdi Babakhani-Fard², Mohammad Ismail Zibaii²

¹ Dept. of Physics, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

² Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, a chemical sensor is designed and simulated based on the structure of a defective photonic crystal fiber. The computational results based on the finite element method (FEM) show that the geometry of the proposed sensor structure can detect the selected and optimal chemical sensing mode, with ethanol analyte, at a very small surface level of $0.4 \mu\text{m}^2$ with an extremely large sensitivity S~1550 nm/RIU. The geometry of the structure, though confining modes with a very small modal volume $V_{\text{mode}}=0.0005(\lambda/n_{\text{SiO}_2})^3$ in the defect region, drastically reduces light loss and by its resonance, provides a very high-quality factor of $Q=3.1\times 10^8$. In Addition, the structure supports evanescent modes with sufficiently large field amplitude and provides the basis for its use for chemical sensing based on refractive index changes.

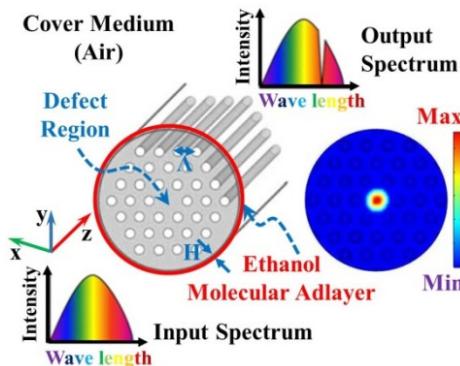
Keywords: Optical Fiber; Defective Photonic Crystal; Refractive Index Sensing; Quality Factor.

* daraei@phys.usb.ac.ir

۱- مقدمه و معرفی

فیبرهای نوری بلور فوتونیکی پرکاربردی هستند که به واسطه اختلاف ضریب شکست هسته و پوشش ساختار خود، بر مبنای پدیده بازتاب داخلی کلی و نیز برخوردی از ویژگی گاف نواری فوتونیکی بر مبنای تناوبی بودن ثابت دیالکتریک، مددایت شده نوری را در هسته فیبر بدام انداخته و با اتلاف ناچیزی در طول آن هدایت می‌کنند [۱]. به جز مدھای هدایت شده در طول هسته فیبر، مدھای میراشونده نوری نیز وجود دارد که میرایی آنها می‌تواند مشابه قانون بیرلمبرت، به صورت نمایی در پوشش هوای فیبر نفوذ پیدا کند [۲و۳]. این مدھای میراشونده، در صورت داشتن دامنه میدان نسبتاً قابل ملاحظه، می‌توانند با برهم‌کنش نوری با آنالیت‌های در تماس مجاور غلاف/پوشش فیبر، نقش بهسزایی در حسگری غیر نشاندار نمونه، ایفا کنند [۴]. حسگری فوتونیکی در استفاده از فیبرها، تحت عنوان آزمایشگاه بر روی فیبر (Lab-on-Fiber)، در قیاس با فناوری سیستم‌های نظیر آزمایشگاه بر روی تراشه (Lab-on-Chip)، مطرح می‌باشد که در سه مقوله اصلی آزمایشگاه در توک، محیط و داخل (Lab-on-Tip, Lab-Around-Fiber and Lab-In-Fiber) صورت می‌پذیرد [۴و۵]. در این مقاله، برای دستیابی به یک سیستم نوری با کاربرد حسگری شیمیایی، یک حسگر فیبر بلور فوتونی نقص‌دار طراحی و شبیه سازی شده است که قادر است با تشديد و محبوس‌سازی مد حسگری شیمیایی با یک فاکتور کیفیت Q بالا و حجم مدل V_{mode} بسیار کوچک در ناحیه نقص بلور و همچنین با بکارگیری لایه‌های بسیار نازکی از آنالیت شیمیایی اتانول در جداره استوانه‌ای آن برای حسگری در بازه طیف فرکانسی بزرگ، به واسطه گاف نواری پهن، با حساسیت بالا مورد استفاده قرار گیرد.

مطابق طرحواره شکل ۱، ساختار پیشنهادی مشتمل بر یک فیبر سیلیکایی ($n_{SiO_2}=1.44$) چند مدل متداول به شعاع $r_{core} \sim 4446\text{ nm}$ می‌باشد که شبکه مثلثی از حفره‌های هوا استوانه‌ای موازی محور (به سطح مقطع دایروی به شعاع $r_{cylinder}$) با دوره تناوبی Λ در سطح مقطع عرضی آن ایجاد شده است. این فیبر بلور فوتونی دو بعدی حاوی یک نقص نقطه‌ای فرنکل است که موجب شده مد حسگری شیمیایی که به واسطه گاف نواری فوتونی تا قبل از ایجاد نقص اجازه انتشار در ساختار را نداشت اکنون با یک حجم مدل V_{mode} بسیار کوچک و با یک فاکتور کیفیت Q بالا در ناحیه نقص محوری متوجه شده و در مغزی هدایت شود.



شکل ۱- طرحواره فیبر بلور فوتونی نقص‌دار پیشنهادی به منظور حسگری مولکول‌های اتانول.

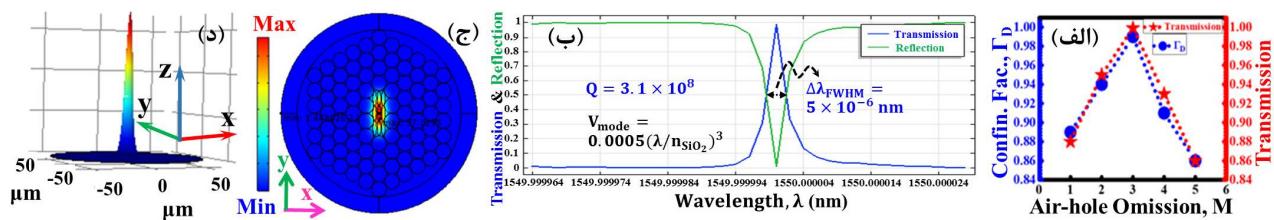
۲- سنجش حساسیت در فیبر بلور فوتونی نقص‌دار

طبق رابطه (۱) شرط تشید براگ در منطقه اول بریلوئن [۱]، دوره تناوب حفره‌های هوا استوانه‌ای موازی محور (به شعاع $r_{cylinder}=\Lambda/2$) در ساختار فیبر بلور فوتونی به اندازه $\Lambda=635.25\text{ nm}$ در نظر گرفته شده است تا گاف نواری فوتونی پهنی در اطراف ناحیه طیفی مد پایه TE₁₁ در حوالی طول موج پنجره سوم مخابراتی ($\lambda=1550\text{ nm}$) به منظور مد حسگری شیمیایی ایجاد شود.

$$\Lambda = \lambda_B / 2n \quad \xrightarrow{\lambda_B = 1550\text{ nm} \quad \& \quad n = (n_{SiO_2} + n_{Air})/2} \quad \Lambda = 635.25\text{ nm} \quad (1)$$

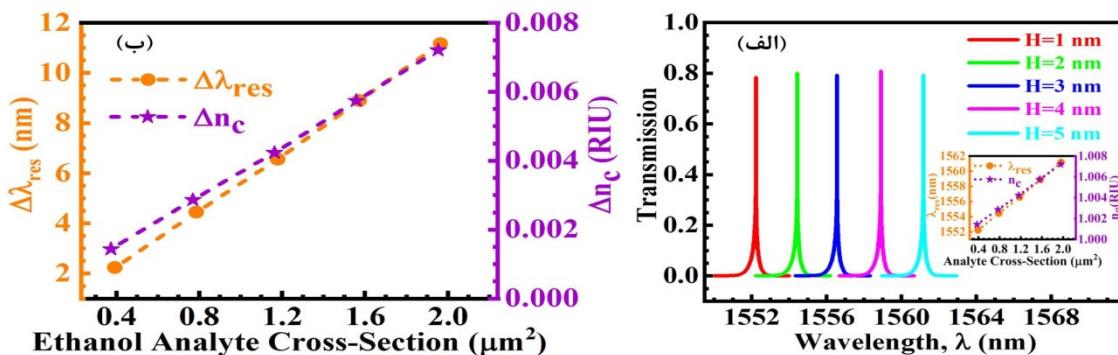
که λ_B و n بترتیب طول موج براگ و ضریب شکست میانگین المان‌های تشکیل‌دهنده سلول واحد آینه براگ (سیلیکا و هوا) هستند.

نقص ایجاد شده در ساختار بلور فوتونی موجب می‌شود که این ساختار نوری به یک تشیدیدگر فوتونیکی مفید تبدیل شود [۴]. با دستکاری و یا حذف تعداد حفره‌های هوا استوانه‌ای مرکزی (M) ساختار فیبر بلور فوتونی، تغییر ضریب عبور و بیشینه‌سازی محبوس شدگی (Γ_D) جهت دستیابی به مد حسگری شیمیایی در ناحیه نقص بررسی شده است. نتایج محاسبات بر اساس المان اجزاء محدود و بهینه‌سازی پارامترها که در نمودارهای شکل ۲-الف و ب آورده شده است، نشان می‌دهد که ساختار مذکور به ازاء حذف سه عدد استوانه هوا مركزی، تبدیل به یک تشیدیدگر مناسبی می‌شود که قادر است مد حسگری را با ضریب محبوس شدگی ماکریم $\Gamma_D=1$ و حجم مدي بسیار کوچک $V_{mode}=0.0005(\lambda/n_{SiO_2})^3$ و با یک فاکتور کیفیت بزرگ $Q=3.1\times 10^8$ در ناحیه نقص مرکز و تشیدید نموده که می‌تواند برای حسگری مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. طرحواره میدان این مد بهینه‌شده در سطح مقطع برشی $x-y$ و از نمای سه‌بعدی عمود بر آن (محوری) بترتیب در شکل‌های ۲-ج و د نشان داده شده است.



شکل ۲-الف) نمودار ضرایب محبوس شدگی (Γ_D) و عبور مد بهینه‌شده برای حسگری، بر حسب تعداد M نقص استوانه هوا، ب) نمودارهای طیف عبور و بازتاب؛ پروفیل میدان این مد ج) در سطح مقطع برشی $x-y$ و د) از نمای سه‌بعدی عمود بر آن (محوری).

برای اندازه‌گیری میزان حساسیت (S) این فیبر بلور فوتونی نقص دار بهینه‌شده، لایه‌های بسیار نازکی از آنالیت شیمیایی اتانول به ضخامت H (به ضریب شکست $n_{ethanol}=1.352$ و ضریب جذب $\alpha_{ethanol}\sim 5.63\text{ cm}^{-1}$) مطابق طرحواره شکل ۱ به جداره استوانه‌ای آن اضافه شده است. مطابق نتایج بدست آمده در شکل ۳-الف و ب مشاهده می‌شود که سطح بسیار کوچک $0.4\text{ }\mu\text{m}^2$ از آنالیت اتانول را با حساسیت بالای $S\sim 1550\text{ nm/RIU}$ را می‌توان آشکارسازی کرد. بنابراین در جمع‌بندی، حسگر پیشنهادی بر پایه ساختار یک فیبر بلور فوتونی نقص دار، با کنترل مدهای با فاکتور کیفیت بزرگ و افزایش محبوس شدگی و مرکز آن در نواحی مطلوب، می‌تواند کاندیدای مناسبی برای آشکارسازی مواد شیمیایی و پارامترهای زیستی غیر نشان دار باشد.



شکل ۳-الف) نمودارهای جایه‌جایی طیف عبور، ب) تغییرات طول موج تشیدیدی $\Delta\lambda_{res}$ و ضریب شکست Δn_C پوشش فیبر بلور فوتونی بهینه‌شده به ازاء ضخامت (H) و سطوح مختلف لایه اتانول.

مراجع

- B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, 2019.
- M. I. Zibaii et. al. *Journal of Lightwave Technology* **34**(19), 4516-4524, 2016.
- V. Patrizio, et al. *Laser & Photonics Reviews* **10**(6), 922-961, 2016.
- Md. Ahsan Habib et. al. *Optical Review*, 1-10, 2021.