



پژوهشکده لیزر و پلاسما

اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبر نوری - ۶ آبان ۱۴۰۰

ICOFS 2021

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، احمدرضا دارائی^{۱*}، محمد مهدی باباخانی فرد^۲، محمد اسماعیل زبائی^۲

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

^۲ پژوهشکده لیزر و پلاسما، 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 و شناسایی کند. هندسه ساختار، ضمن محبوس سازی مدهایی با حجم مدی 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 میراثونده به اندازه کافی بزرگ، پشتیبانی نموده و زمینه را برای استفاده از آن برای حسگری مواد شیمیایی بر پایه تغییرات ضریب شکست، فراهم آورده است.

کلید واژگان: فیبر نوری؛ بلور فوتونی نقص دار؛ حسگری ضریب 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 $S \sim 1550 \text{ nm/RIU}$. 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.

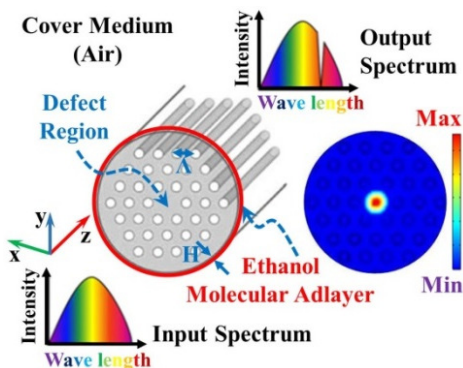
Keywords: Optical Fiber; Defective Photonic Crystal; Refractive Index Sensing; Quality Factor.

* daraei@phys.usb.ac.ir

۱- مقدمه و معرفی

فیبرهای نوری بلور فوتونی از دسته تارهای فوتونیک پرکاربردی هستند که به واسطه اختلاف ضریب شکست هسته و پوشش ساختار خود، بر مبنای پدیده بازتاب داخلی کلی و نیز برخورداری از ویژگی گاف نواری فوتونیک بر مبنای تناوبی بودن ثابت دی الکتریک، مد هدایت شده نوری را در هسته فیبر بدام انداخته و با اتلاف ناچیزی در طول آن هدایت می کنند [۱]. به جز مدهای هدایت شده در طول هسته فیبر، مدهای میراثونده نوری نیز وجود دارد که میرایی آنها می تواند مشابه قانون بیرلمبرت، به صورت نمایی در پوشش هوای فیبر نفوذ پیدا کند [۲]. این مدهای میراثونده، در صورت داشتن دامنه میدان نسبتاً قابل ملاحظه، می توانند با برهم کنش نوری با آنالیت های در تماس مجاور غلاف/پوشش فیبر، نقش به سزایی در حسگری غیر نشاندار نمونه، ایفا کنند [۲]. حسگری فوتونیک در استفاده از فیبرها، تحت عنوان آزمایشگاه بر روی فیبر (Lab-on-Fiber)، در قیاس با فناوری سیستم هایی نظیر آزمایشگاه بر روی تراشه (Lab-on-Chip)، مطرح می باشد که در سه مقوله اصلی آزمایشگاه در نوک، محیط و داخل (Lab-on-Tip, Lab-Around-Fiber and Lab-In-Fiber) صورت می پذیرد [۳ و ۴]. در این مقاله، برای دستیابی به یک سیستم نوری با کاربرد حسگری شیمیایی، یک حسگر فیبر بلور فوتونی نقص دار طراحی و شبیه سازی شده است که قادر است با تشدید و محبوس سازی مد حسگری شیمیایی با یک فاکتور کیفیت Q بالا و حجم مدی V_{mode} بسیار کوچک در ناحیه نقص بلور و همچنین با بکارگیری لایه های بسیار نازکی از آنالیت شیمیایی اتانول در جداره استوانه ای 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 مدی متداول به شعاع $r_{core} \sim 4446 \text{ nm}$ می باشد که شبکه مثلثی از حفره های هوا استوانه ای 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 نقطه ای 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 مدی V_{mode} بسیار کوچک و با یک فاکتور کیفیت Q بالا در ناحیه نقص محوری متمرکز شده و در مغزی هدایت شود.



شکل ۱- طرحواره فیبر بلور فوتونی نقص دار پیشنهادی به منظور حسگری مولکول های اتانول.

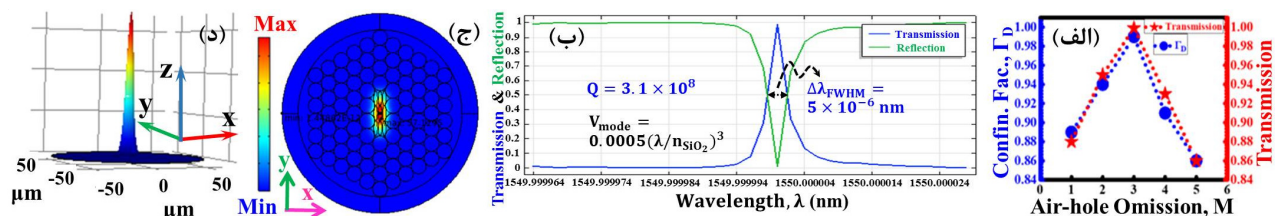
۲- سنجش حساسیت در فیبر بلور فوتونی نقص دار

طبق رابطه (۱) شرط تشدید براگ در منطقه اول بریلوئن [۱]، دوره تناوب حفره های هوا استوانه ای 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 TE_1 در حوالی طول موج پنجره سوم مخابراتی ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) به منظور مد حسگری شیمیایی ایجاد شود.

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

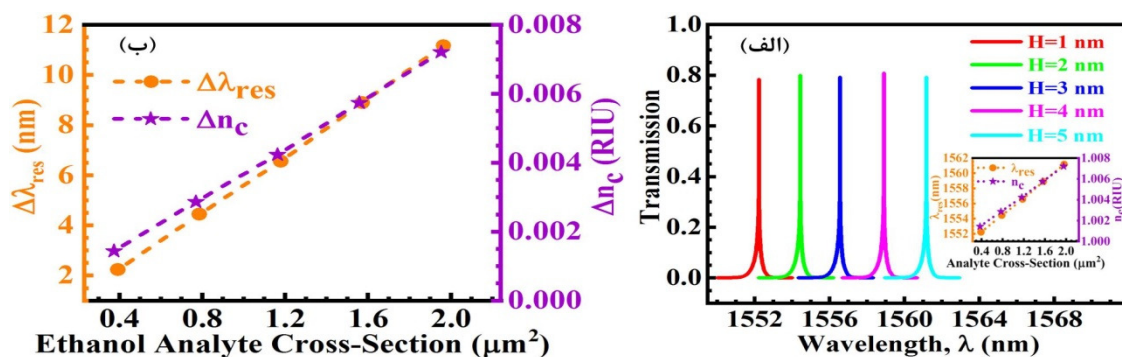
که λ_B و n بترتیب طول موج براگ و ضریب شکست میانگین المان های تشکیل دهنده سلول واحد آینه براگ (سیلیکا و هوا) هستند.

نقص ایجاد شده در ساختار بلور فوتونی موجب می‌شود که این ساختار نوری به یک تشدیدگر فوتونیک مفید تبدیل شود [۴]. با دستکاری و یا حذف تعداد حفره‌های هوا استوانه‌ای مرکزی (M) ساختار فیبر بلور فوتونی، تغییر ضریب عبور و بهینه‌سازی محبوس‌شدگی (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 اِزاء حذف سه عدد استوانه هوای مرکزی، تبدیل به یک تشدیدگر مناسبی می‌شود که قادر است مد حسگری را با ضریب محبوس‌شدگی ماکزیمم $\Gamma_D=1$ و حجم مدی 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 متمرکز و تشدید 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 محبوس‌شدگی (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 نقص‌دار 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 $0.4 \mu\text{m}^2$ 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 نقص‌دار، با کنترل مدهای با فاکتور کیفیت بزرگ و افزایش محبوس‌شدگی و تمرکز آن در نواحی مطلوب، می‌تواند کاندیدای مناسبی برای آشکارسازی مواد شیمیایی و پارامترهای زیستی غیر نشان‌دار باشد.



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

مراجع

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