اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبرنوری- ۶ آبان ۱۴۰۰
ICOFS 2021
1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors
October 28, 2021
پژوهشکده لیزر و پلاسما

شبیه‌سازی حسگر شیمیایی برپایه ساختار فیبر بلور فوتونی نقص‌دار

محمد قهرمانی مقدم[۱]، احمدرضا دارائی[۱،*]، محمدمهدی باباخانی‌فرد[۲]، محمداسماعیل زیبائی[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 نقص‌دار طراحی و شبیه سازی شده است. نتایج محاسباتی برپایه روش المان محدود نشان می‌دهند که هندسه ساختار حسگر پیشنهادی قادر است مد منتخب و مطلوب حسگری مواد شیمیایی، با آنالیت اتانول، را در سطح بسیار کوچک $0.4\ \mu m^2$ با حساسیت فوق‌العاده بزرگ S~1550 nm/RIU شناسایی کند. هندسه ساختار، ضمن محبوس‌سازی مدهایی با حجم مدی بسیار کوچک $V_{mode}=0.0005(\lambda/n_{SiO_2})^3$ در ناحیه نقص، اتلاف نوری را به‌شدت کاهش داده و با تشدید آن، فاکتور کیفیت بسیار بالای $Q=3.1\times10^8$ را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، ساختار مدهایی را با دامنه میراشونده به اندازه کافی بزرگ، پشتیبانی نموده و زمینه را برای استفاده از آن برای حسگری مواد شیمیایی برپایه تغییرات ضریب شکست، فراهم آورده است.

کلید واژگان: فیبر نوری؛ بلور فوتونی نقص‌دار؛ حسگری ضریب شکست؛ فاکتور کیفیت.

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

Mohammad Ghahremani Moghadam [1], Ahmadreza Daraei[1,*], Mohammad-Mahdi Babakhani-Fard [2] , Mohammad Ismail Zibaii[2]

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 $0.4\ \mu m^2$ with an extremely large sensitivity S~1550 nm/RIU. The geometry of the structure, though confining modes with a very small modal volume $V_{mode}=0.0005(\lambda/n_{SiO_2})^3$ in the defect region, drastically reduces light loss and by its resonance, provides a very high-quality factor of $Q=3.1\times10^8$. 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

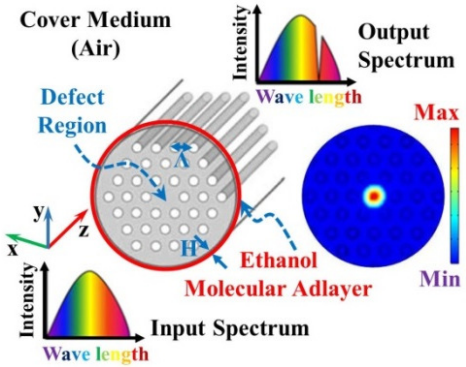
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-20]

۱- مقدمه و معرفی

فیبرهای نوری بلور فوتونی از دسته تارهای فوتونیکی پرکاربردی هستند که به‌واسطه اختلاف ضریب شکست هسته و پوشش ساختار خود، بر مبنای پدیده بازتاب داخلی کلی و نیز برخورداری از ویژگی گاف نواری فوتونیکی بر مبنای تناوبی بودن ثابت دی‌الکتریک، مد هدایت‌شده نوری را در هسته فیبر بدام انداخته و با اتلاف ناچیزی در طول آن هدایت می‌کنند[۱]. به‌جز مدهای هدایت‌شده در طول هسته فیبر، مدهای میراشونده نوری نیز وجود دارد که میرایی آن‌ها می‌تواند مشابه قانون بیرلمبرت، به‌صورت نمایی در پوشش هوای فیبر نفوذ پیدا کند[۱و۲]. این مدهای میراشونده، در صورت داشتن دامنه میدان نسبتاً قابل‌ملاحظه، می‌توانند با برهم‌کنش نوری با آنالیت‌های در تماس مجاور غلاف/پوشش فیبر، نقش به‌سزایی در حسگری غیر نشاندار نمونه، ایفا کنند[۲]. حسگری فوتونیکی در استفاده از فیبرها، تحت عنوان آزمایشگاه بر روی فیبر (Lab-on-Fiber)، در قیاس با فناوری سیستم‌هایی نظیر آزمایشگاه بر روی تراشه (Lab-on-Chip)، مطرح می‌باشد که در سه مقوله اصلی آزمایشگاه در نوک، محیط و داخل (Lab-on-Tip, Lab-Around-Fiber and Lab-In-Fiber) صورت می‌پذیرد[۳و۴]. 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 تشدید و محبوس‌سازی مد حسگری شیمیایی با یک فاکتور کیفیت Q بالا و حجم مدی 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، به‌واسطه 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}~4446 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 به‌واسطه 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 نقص‌دار پیشنهادی به‌منظور حسگری مولکول‌های اتانول.

۲- سنجش حساسیت در فیبر بلور فوتونی نقص‌دار

طبق رابطه (۱) شرط تشدید 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 Λ=635.25 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 (λ=1550 nm) به منظور مد حسگری شیمیایی ایجاد شود.

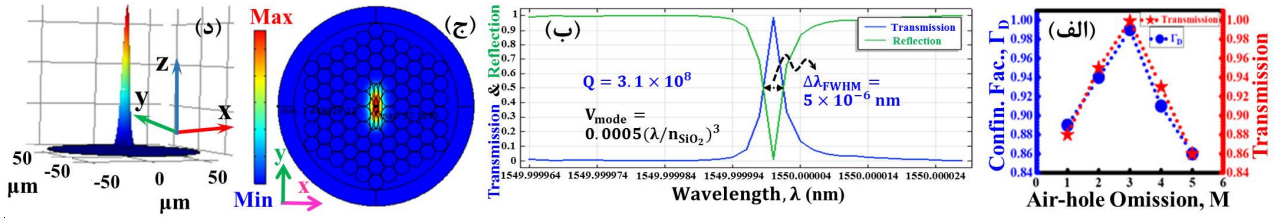
$$\Lambda = \lambda_B/2n \xrightarrow{\lambda_B=1550\ \text{nm} \ \&\ n=(n_{SiO_2}+n_{Air})/2} \Lambda = 635.25\ \text{nm} \qquad (۱)$$

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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

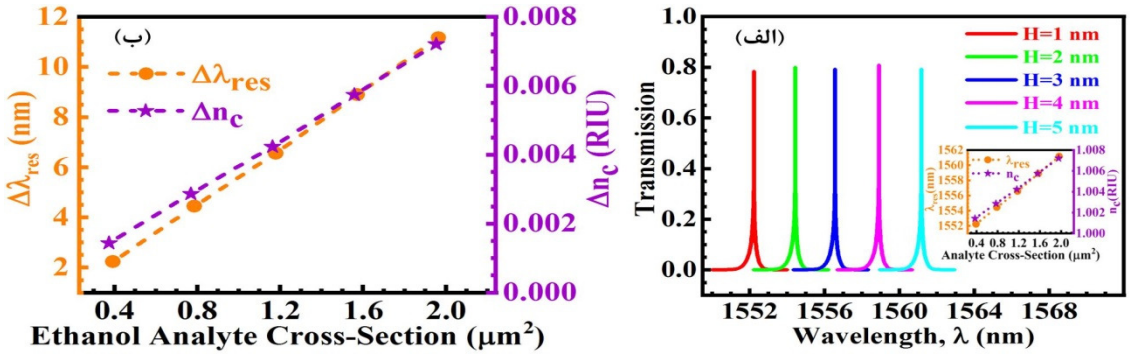
[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-20]

نقص ایجاد شده در ساختار بلور فوتونی موجب می‌شود که این ساختار نوری به یک تشدیدگر 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 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 ازاء حذف سه عدد استوانه هوای مرکزی، تبدیل به یک تشدیدگر مناسبی می‌شود که قادر است مد حسگری را با ضریب محبوس‌شدگی ماکزیمم Γ_D=1 و حجم مدی بسیار کوچک $V_{mode}=0.0005(\lambda/n_{SiO_2})^3$ و با یک فاکتور کیفیت بزرگ $Q=3.1\times10^8$ در ناحیه نقص متمرکز و تشدید نموده که می تواند برای حسگری مواد شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد. طرحواره میدان این مد بهینه‌شده در سطح مقطع برشی x-y و از نمای سه‌بُعدی 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 سه‌بُعدی 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 $\alpha_{ethanol}$~5.63 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 μm^2 از آنالیت اتانول را با حساسیت بالای S~1550 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 طول‌موج تشدیدی $\Delta\lambda_{res}$ و ضریب شکست Δn_c پوشش فیبر بلور فوتونی بهینه‌شده به ازاء 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.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2024-04-20]