



پژوهشکده لیزر و پلاسما

اولین کنفرانس ملی حسگرهای فیبر نوری - ۱۴۰۰

ICOFS 2021

1st Iranian Conference on Optical Fiber Sensors

October 28, 2021



مدل سازی تشدیدگر بلور فوتونی چرخاننده قطبش روی عایق برای آشکارسازی غیر نشان دار DNA

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

^۱ پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

^۲ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

چکیده: در این مقاله، ساختار یک زیست حسگر تشدیدگر بلور فوتونی مبتنی بر یک نانوباریکه چهار هسته ضربه‌ری سیلیکونی-سیلیکون نیتریدی بر روی عایق سیلیکا با هندسه دیواره‌های باریک‌شونده بیضوی دارای پراشه‌های تناوبی هوا در طول ساختار، مدل سازی شده است. نتایج محاسباتی نشان دادند که ساختار با تشدید مد حسگری با فاکتور کیفیت بزرگ $Q \approx 9827.8$ و محبوس سازی آن با حجم مدی بسیار کوچک $V_{\text{mode}} = 0.001(\lambda_{\text{res}}/n_{\text{eff}})^3$ در ناحیه میکروکاوک و ایجاد گاف نواری پهن 646.5 nm، می‌تواند برای آشکارسازی پارامترهای زیستی در طیف وسیعی از فرکانس‌ها استفاده شود. این ساختار قادر است سطح بسیار کوچک $0.0045 \mu\text{m}^2$ از محلول تحلیل‌شونده مولکول‌های DNA را با حساسیت‌های سطحی و تشدیدی بسیار بزرگ به ترتیب برابر با $S_{\text{sur}} \approx 0.0008 \text{ RIU/nm}$ و $S_{\text{res}} \approx 340.6 \text{ nm/RIU}$ آشکارسازی نماید.

کلید واژگان: بلور فوتونی؛ تشدیدگر نوری؛ حسگری غیرنشان‌دار؛ ضریب شکست.

Modeling of a Polarization Rotator Photonic Crystal Resonator on Insulator for Label-Free DNA Detection

Mohammad-Mahdi Babakhani-Fard¹, Ahmadreza Daraei^{2,*}, Mohammad Ghahremani Moghadam², Mohammad Ismail Zibaii¹

¹ Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

² Dept. of Physics, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

Abstract: In this paper, a structure of photonic crystal resonator biosensor based upon a quad-core silicon- silicon nitride cross-beam on silica insulator with the elliptical geometry of tapered walls including periodic air grating along the entire structure is modeled. The computational results showed that the structure can be used to detect biological parameters in a wide range of frequencies by intensifying the sensing mode with a large quality factor $Q \approx 9827.8$ and confining with a very small modal volume $V_{\text{mode}} = 0.001(\lambda_{\text{res}}/n_{\text{eff}})^3$ in the microcavity area and creating a wide bandgap of 646.5 nm. This structure is capable of detecting a very small surface area of $0.0045 \mu\text{m}^2$ from the analyzed solution of DNA molecules with very high surface and resonance Sensitivities equal to $S_{\text{sur}} \approx 0.0008 \text{ RIU/nm}$ and $S_{\text{res}} \approx 340.6 \text{ nm/RIU}$, respectively.

Keywords: Photonic Crystal; Optical Resonator; Label-Free Sensing; Refractive Index.

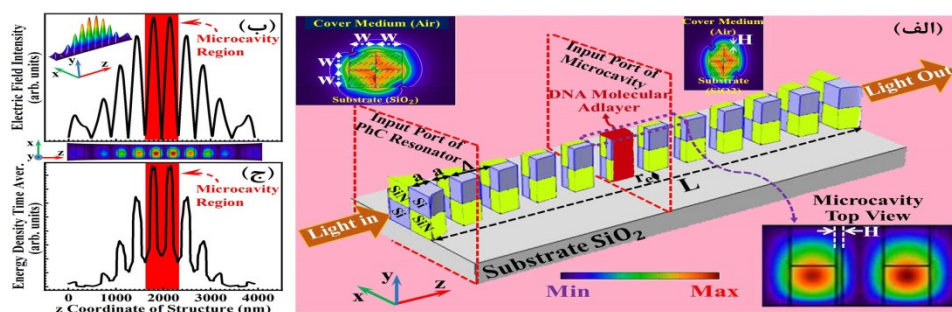
¹ babakhani.m@yahoo.com

^{2,*} daraei@phys.usb.ac.ir

۱- مقدمه و معرفی

نانوباریک‌های تشدیدگر بلور فوتونی بسبب ویژگی‌های منحصربفردی از قبیل تشدید و محبوس‌سازی مد نوری با فاکتور کیفیت Q بسیار بزرگ و حجم مدی V_{mode} بسیار کوچک در میکروکاوک و همچنین ابعاد بسیار کوچک آن‌ها، امکان یکپارچه‌سازی نوری بر روی تراشه آزمایشگاهی کوچک تحت اصطلاح آزمایشگاه بر روی تراشه را محقق ساخته است. این ساختارها قادرند به‌عنوان یک ادوۀ منفعل فوتونیک، تحلیل‌شونده‌های زیستی، پزشکی، شیمیایی را با حساسیت بالا، بصورت غیرنشان‌دار در زمان واقعی آشکارسازی نمایند [۱-۳].

ساختار حسگر زیستی-پزشکی ارائه شده در این مقاله، مطابق طرح‌واره شکل ۱-الف، مبتنی بر یک نانوباریک بلور فوتونی چهارهسته ضربدری سیلیکونی ($n_{\text{Si}}=3.45$) و سیلیکون‌نیتريدی ($n_{\text{SiN}}=2.36$) بر روی عایق سیلیکا ($n_{\text{SiO}_2}=1.44$) با دیواره‌های باریک‌شونده در مرکز با هندسه بیضوی به نیم‌قطر کوچک r_e می‌باشد که پراشه‌های هوا به پهنای a با دوره تناوب $\Lambda=2a$ در طول آن ایجاد شده است. نمونه‌هایی از طرح‌واره میدان و نمودارهای مقطع برشی ساختار پیشنهادی، که از شبیه‌سازی با روش المان محدود (FEM) و با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics (Ver. 5.3a) بدست آمده‌اند، در شکل ۱-ب و ج نشان داده شده است.



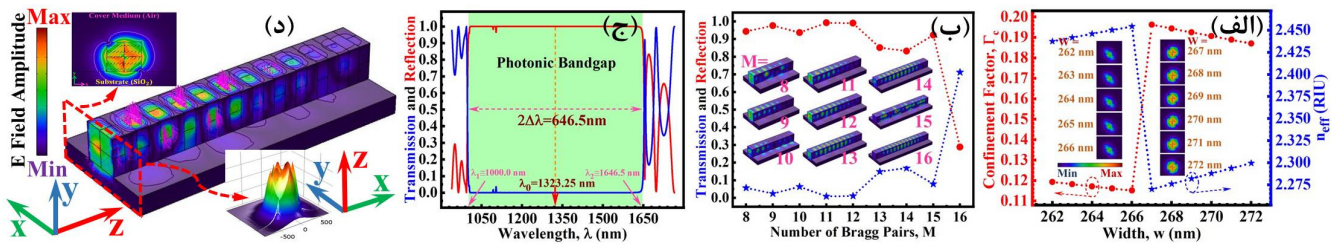
شکل ۱- (الف) طرح‌واره ساختار نانوباریک تشدیدگر چهارهسته ضربدری روی عایق با دیواره‌های باریک‌شونده، به‌منظور حسگری مولکول‌های DNA. (ب) و (ج) پروفیل و نمودارهای توزیع میدان الکتریکی و چگالی انرژی مد حسگری ساختار (با مؤلفه‌های بهینه‌شده $w=267$ nm و $a=\Lambda/2=170.705$ nm، $L=12\Lambda$ ، $r_e=45.99$ nm).

۲- اصول، طراحی و بهینه‌سازی ساختار حسگر

مولکول‌های DNA ($n_{\text{DNA}} \approx 1.414$) برهم‌کنش نوری مناسبی در طول موج پنجره سوم مخابراتی داشته و زیرلایه سیلیکایی و نانوباریک‌های Si و SiN به‌کار گرفته شده در ساختار پیشنهادی نیز جذب نوری بسیار ناچیزی در این ناحیه طیفی دارند. همچنین قطبش نوری TM ، با تمرکز بخشیدن مد تشدیدی براگ در پراشه‌های با ضریب شکست بیش‌تر در این ساختار، موجب می‌شود که گاف نواری بسیار پهنی در گستره طیفی حاصل گردد [۴]. از این‌رو، مد پایه TM_1 با طول موج $\lambda \approx 1550$ nm به‌عنوان مد حسگری انتخاب شده و مطابق نمودار شکل ۲-الف، پهنای w چهار باریک ضربدری Si و SiN به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که ضریب محبوس‌شدگی مد میرا شونده حسگری Γ_c ، در پوشش هوای ساختار بیشینه شود. نتایج بهینه‌سازی، به‌ازاء پهنای $w=267$ nm، بیشینه ضریب محبوس‌شدگی نوری $\Gamma_c \approx 0.2$ را در پوشش هوا دارا است. لازم به توضیح است که به مقتضی شرط تشدید براگ در منطقه اول بریلوئن، دوره تناوب پراشه‌های هوای ایجاد شده در ساختار بلور فوتونی پیشنهادی، با بهره‌گیری از رابطه ۱ به اندازه $\Lambda=2a=341.41$ nm محاسبه شده است [۴].

$$\Lambda = \lambda_B / 2n \quad \{ \lambda_B = 1550 \text{ nm} \ \& \ n = (n_{\text{Si}} + n_{\text{SiN}} + n_{\text{Air}}) / 3 \} \implies \Lambda = 341.41 \text{ nm} \quad (1)$$

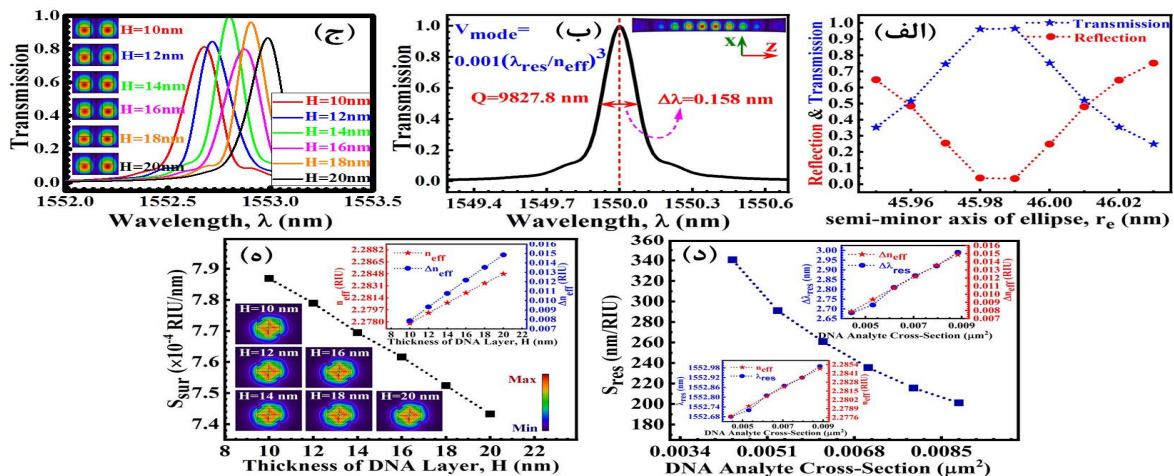
با استفاده از مؤلفه‌های بهینه w و Λ ، تعداد آینه‌های براگ، M ، تشکیل‌دهنده باریک بلور فوتونی به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که مد حسگری با توجه به نمودارهای عبور و بازتاب شکل ۲-ب و ج، به‌ازاء $M=12$ آینه براگ، دارای بیشینه بازتابندگی یک بوده و گاف نواری بسیار پهن $2\Delta\lambda=646.5$ nm (بازه 1000-1646.5 nm) را شامل شده و مطابق پروفیل میدان شکل ۲-د، بردار میدان الکتریکی مد حسگری را پس از هر بار عبور از آینه‌های براگ به‌گونه‌ای می‌چرخاند که مد میرا شونده نفوذ چندانی به زیرلایه سیلیکایی نداشته باشد.



شکل ۲- (الف) ضریب محبوس‌شدگی مد حسگری (Γ_c) بر حسب پهناهای W مختلف چهار باریکه ضربدری، (ب) ضرایب عبور و بازتاب برحسب تعداد M آینه براگ، (ج) نوار توقف برای طول بهینه ساختار $L=12\Lambda$ و (د) پروفیل میدان E مد حسگری در ساختار (با مؤلفه‌های بهینه $w=267$ nm، $a=\Lambda/2=170.705$ nm و $L=12\Lambda$).

۳- طراحی ساختار تشدیدگر حسگری و سنجش حساسیت

برای تبدیل این بلور بهینه‌شده به یک تشدیدگر با فاکتور نسبتی Q/V_{mode} خیلی بزرگ، دیواره‌های جانبی این ساختار، به‌صورت بیضوی با نیم‌قطر کوچک r_e باریک شد. نتایج بهینه‌سازی شکل ۳- الف و ب نشان می‌دهد که این تشدیدگر به ازاء مقدار $r_e=45.99$ nm، مد حسگری را با فاکتور کیفیت بزرگ $Q \approx 9827.8$ و حجم مدی بسیار کوچک $V_{\text{mode}}=0.001(\lambda_{\text{res}}/n_{\text{eff}})^3$ تشدید می‌کند. لایه بسیار نازکی از مولکول‌های DNA به ضخامت H در پراشه هوا و جداره جانبی میکروکاواک تثبیت شده است تا میزان جابه‌جایی طول‌موج تشدیدی $\Delta\lambda_{\text{res}}$ نسبت به تغییر ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} (برای حساسیت تشدیدی $S_{\text{res}}=\Delta\lambda_{\text{res}}/\Delta n_{\text{eff}}$) و همچنین میزان تغییر ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} به‌ازاء تغییر ضخامت ΔH آنالیت (برای حساسیت سطحی $S_{\text{sur}}=\Delta n_{\text{eff}}/\Delta H$) محاسبه شود. نتایج بدست آمده مطابق شکل ۳ نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی قادر است سطح بسیار کوچک $0.0045 \mu\text{m}^2$ از آنالیت مولکول‌های DNA را با حساسیت‌های سطحی و تشدیدی بسیار بزرگ بترتیب $S_{\text{res}} \approx 340.6$ nm/RIU و $S_{\text{sur}} \approx 0.0008$ RIU/nm بصورت غیرنشاندار آشکارسازی نماید. در جمع‌بندی، ساختار طراحی‌شده تشدیدگر بلور فوتونی چهارهسته ضربدری بر روی عایق، با تنظیم هندسه دیواره‌ها و لایه‌های متشکله می‌تواند با کنترل قطبش میدان و با محبوس‌سازی بهتر مد در پوشش و پراشه‌های هوای ساختار، زمینه بسیار مناسبی را جهت حسگری زیستی-پزشکی فراهم آورد.



شکل ۳- (الف) ضرایب بازتاب و عبور مد حسگری به ازاء نیم‌قطرهای کوچک r_e باریک‌شدگی بیضی دیواره ساختار، (ب) سیگنال حسگری، (ج) جابه‌جایی طول‌موج سیگنال حسگری برحسب ضخامت H مختلف لایه DNA، (د) حساسیت‌های تشدیدی S_{res} و (ه) سطحی S_{sur} ساختار به سطوح و ضخامت‌های H مختلف آنالیت DNA.

مراجعه

1. Mohammad-Mahdi Babakhani-Fard *et al.* *The European Physical Journal Plus* **135**(3), 1-13, 2020.
2. Ahmadrza Daraei *et al.* *Applied Physics A* **122**(7), 1-6, 2016.
3. Mohammad Ismail Zibaii *et al.* In **25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)**, 1-4, IEEE, South Korea, 2017.
4. B. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, Ch. 7, (2019).