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

مدل‌سازی تشدیدگر بلور فوتونی چرخاننده قطبش روی عایق برای آشکارسازی غیر نشان‌دار DNA

محمدمهدی باباخانی‌فرد[۱]، احمدرضا دارائی[۲،*]، محمد قهرمانی مقدم[۲]، محمداسماعیل 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 زیست‌حسگر تشدیدگر بلور فوتونی مبتنی بر یک نانوباریکه چهارهسته ضربدری سیلیکُنی-سیلیکُن‌نیتریدی بر روی عایق سیلیکا با هندسه دیواره‌های باریک‌شونده بیضوی دارای پراشه‌های تناوبی هوا در طول ساختار، مدل‌سازی شده است. نتایج محاسباتی نشان دادند که ساختار با تشدید مد حسگری با فاکتور کیفیت بزرگ $Q\approx9827.8$ و محبوس‌سازی آن با حجم مدی بسیار کوچک $V_{mode}=0.001(\lambda_{res}/n_{eff})^3$ در ناحیه میکروکاواک 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 μm^2 از محلول تحلیل‌شونده مولکول‌های DNA را با حساسیت‌های سطحی و تشدیدی بسیار بزرگ بترتیب برابر با $S_{sur}\approx0.0008$ RIU/nm و $S_{res}\approx340.6$ 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-Fard[1], Ahmadreza Daraei[2,*], Mohammad Ghahremani Moghadam[2], Mohammad Ismail Zibaii[1]

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 $Q\approx9827.8$ and confining with a very small modal volume $V_{mode}=0.001(\lambda_{res}/n_{eff})^3$ 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 μm^2 from the analyzed solution of DNA molecules with very high surface and resonance Sensitivities equal to $S_{sur}\approx0.0008$ RIU/nm and $S_{res}\approx340.6$ nm/RIU, respectively.

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

[1] babakhani.m@yahoo.com
[2,*] daraei@phys.usb.ac.ir

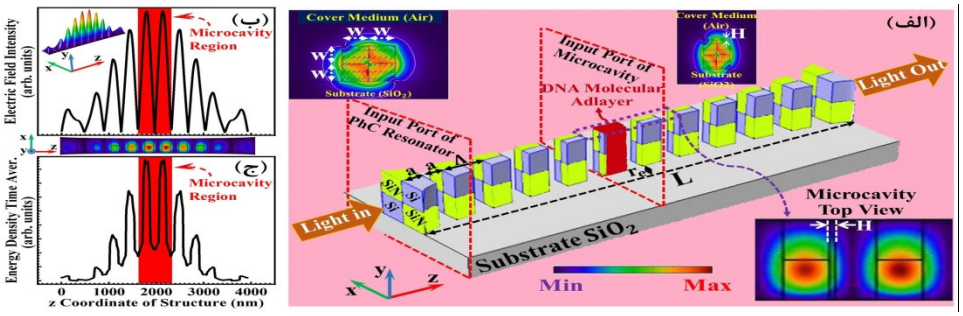
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت http://opsi.ir/ قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]

۱- مقدمه و معرفی

نانوباریکه‌های 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 میکروکاواک 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 ادوه منفعل فوتونیکی، تحلیل‌شونده‌های زیستی، پزشکی، شیمیایی را با حساسیت بالا، بصورت غیرنشان‌دار در زمان واقعی آشکارسازی نمایند[۳-۱].

ساختار حسگر زیستی-پزشکی ارائه شده در این مقاله، مطابق طرحواره شکل ۱-الف، مبتنی بر یک نانوباریکه بلور فوتونی چهارهسته ضربدری سیلیکُنی (n_{Si}=3.45) و سیلیکون‌نیتریدی (n_{SiN}=2.36) بر روی عایق سیلیکا (n_{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 Λ=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 نانوباریکه 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 r_e=45.99 nm، L=12Λ، a=Λ/2=170.705 nm و w=267 nm).

۲- اصول، طراحی و بهینه‌سازی ساختار حسگر

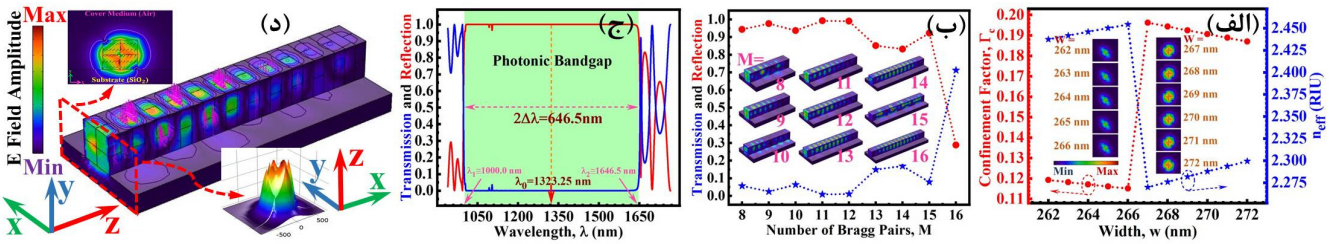
مولکول‌های DNA ($n_{DNA}\approx$1.414) برهم‌کنش نوری مناسبی در طول‌موج پنجره سوم مخابراتی داشته و زیرلایه سیلیکایی و نانوباریکه‌های Si و SiN به‌کار گرفته شده در ساختار پیشنهادی نیز جذب نوری بسیار ناچیزی در این ناحیه طیفی دارند. همچنین قطبش نوری TM، با تمرکز بخشیدن مد تشدیدی براگ در پراشه‌های با ضریب 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 طول‌موج $\lambda\approx$1550 nm به‌عنوان مد حسگری انتخاب شده و مطابق نمودار شکل ۲-الف، پهنای w چهار باریکه ضربدری Si و SiN به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که ضریب محبوس‌شدگی مد میراشونده حسگری Γ_c، در پوشش هوای ساختار بیشینه شود. نتایج بهینه‌سازی، به ازاء پهناهای w=267 nm، بیشینه ضریب محبوس‌شدگی نوری Γ_c~0.2 را در پوشش هوا دارا است. لازم به‌توضیح 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 Λ=2a=341.41 nm محاسبه شده است[۴].

$$\Lambda=\lambda_B/2n \quad \{\text{با: } \lambda_B=1550\text{ nm} \ \& \ n=(n_{Si}+n_{SiN}+n_{Air})/3\} \ \Longrightarrow \ \Lambda=341.41\text{ nm} \qquad (۱)$$

با استفاده از مؤلفه‌های بهینه w و Λ، تعداد آینه‌های براگ، M، تشکیل‌دهنده باریکه بلور فوتونی به‌گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که مد حسگری با توجه به نمودارهای عبور و بازتاب شکل ۲-ب و ج، به ازاء 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 میراشونده نفوذ چندانی به زیرلایه سیلیکایی نداشته باشد.

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

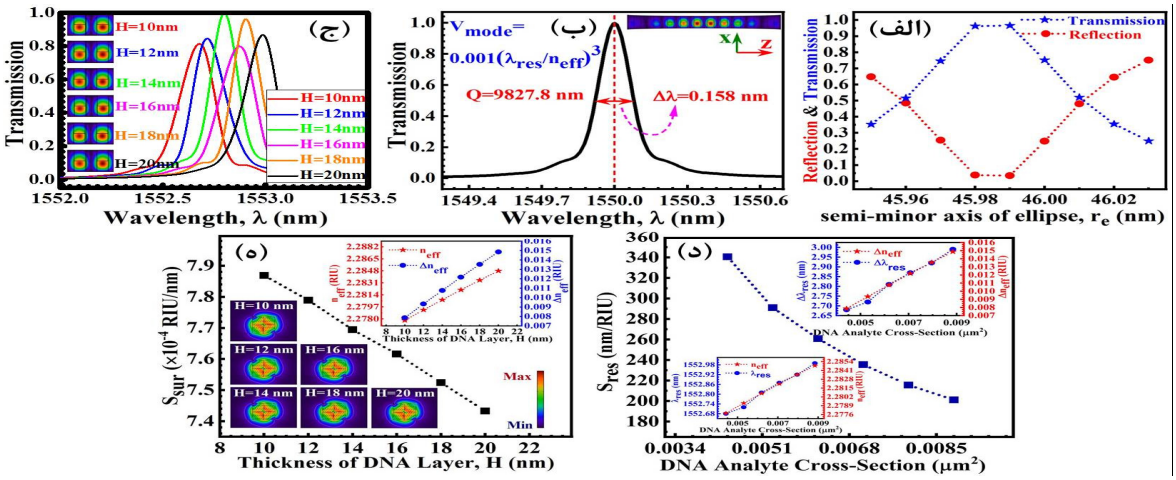
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]



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=12Λ) و د) پروفیل میدان E مد حسگری در ساختار (با مؤلفه‌های بهینه w=267 nm، a=Λ/2=170.705 nm و L=12Λ).

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≈9827.8 و حجم مدی بسیار کوچک $V_{mode}=0.001(\lambda_{res}/n_{eff})^3$ 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 $\Delta\lambda_{res}$ نسبت به تغییر ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} (برای حساسیت تشدیدی $S_{res}=\Delta\lambda_{res}/\Delta n_{eff}$) و همچنین میزان تغییر ضریب شکست مؤثر Δn_{eff} به‌ازاء تغییر ضخامت ΔH آنالیت (برای حساسیت سطحی $S_{sur}=\Delta n_{eff}/\Delta H$) محاسبه شود. نتایج بدست آمده مطابق شکل ۳ نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی قادر است سطح بسیار کوچک 0.0045 μm^2 از آنالیت مولکول‌های DNA را با حساسیت‌های سطحی و تشدیدی بسیار بزرگ بترتیب S_{res}≈340.6 nm/RIU و S_{sur}≈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.



شکل۳- الف) ضرایب بازتاب و عبور مد حسگری به ازاء نیم‌قطرهای کوچک r_e باریک‌شوندگی بیضوی 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.

مراجع

1. Mohammad-Mahdi Babakhani-Fard *et. al*. **The European Physical Journal Plus 135**(3), 1-13, 2020.
2. Ahmadreza 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).

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-10]