



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی تأثیر حفره‌های باریک‌شونده در ساختار نانوباریکه بلور فوتونی بر فاکتور کیفیت مدها، با استفاده از نرم‌افزار COMSOL Multiphysics

عاطفه محسنی فرد و احمدرضا دارائی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

چکیده - در این مقاله، به بررسی مدهای محبوس‌شده در کاواک نانوباریکه بلور فوتونی شامل حفره‌های-هوای باریک‌شونده در ساختار، که تضمین‌کننده فاکتور کیفیت بزرگ و حجم مدی کوچکی هستند، پرداخته شده است. نتایج محاسبات انجام شده برای این‌گونه نانوباریکه بلور فوتونی، افزایش فاکتور کیفیتی تا حدود ۲۰۵۵۰ در محدوده طول‌موج فیبر مخابرات نوری را نشان می‌دهد. مقادیر بیشینه فاکتور کیفیت با ترکیب سری حفره‌های باریک‌شده (*taper*) مجاور نانوکاواک بعلاوه حفره‌ها باریک‌شده دور از نانوکاواک، با طراحی دقیق قطر حفره‌ها و جابجایی حفره‌های غیردوره‌ای، در بخش باریک‌شونده بدست آمده است. شبیه‌سازی در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار *COMSOL Multiphysics* و با روش المان محدود در حوزه فرکانس انجام پذیرفته است.

کلیدواژه- بلور فوتونی، فاکتور کیفیت، نانوباریکه، سری حفره-هوای باریک‌شده، *COMSOL Multiphysics*

Investigation on effect of air-holes taper in a photonic crystal nanobeam cavity structure on the quality factor, using COMSOL Multiphysics

Atefeh Mohsenifard and Ahmadrza Daraei

Dept. of Physics, Faculty of Science, University of Sistan & Baluchestan, Zahedan

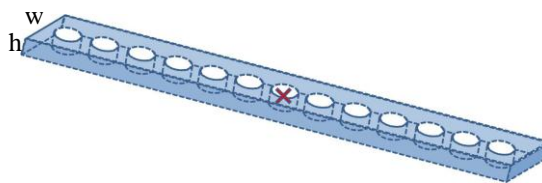
Abstract- In this paper, confined modes in the photonic crystal nanobeam cavities containing air-holes taper is investigated which support small mode volume and high quality factor (Q). Computational results on this type of photonic crystal nanobeam structure demonstrate further increasing of the Q-value approximately 20550 in the fiber optics telecommunications wavelength range. The maximum Q-values obtained by combination of both nanocavity's neighboring tapers and ends tapers plus carefully designed air-hole diameters and their non-periodic displacements within the tapered sections. Simulation in this paper is done using COMSOL Multiphysics software based upon the finite element method in the frequency domain.

Keywords: Nanobeam, Photonic Crystal, Quality Factor, Air-Holes Taper, COMSOL Multiphysics

۱- مقدمه

نانوکاوکاهای بلور فوتونی ایجاد شده در محیطی شامل دی الکتریک- نیمرسانا، نور را در حجم کوچکی در مقیاس کسری از مکعب طول موج نور در محیط، محبوس می کنند [۱]. فاکتور کیفیت بسیار بزرگ مدها و حجم مدی کوچک در این نانوساختارها، کاربردهای جدید و گسترده ای را در حیطه های مختلف مانند لیزرهای با آستانه پایین، اپتیک غیرخطی، تحقق آزمایشات الکتروپدینامیک کوانتومی کاواک در محیط مواد حالت جامد و فیبر مخابرات نوری دارند [۲-۴].

ساختار نانوباریکه بلور فوتونی، همان طوری که در طرحواره شکل ۱ نشان داده شده، دارای آرایه تناوبی از حفره های- هوا (air-holes) در یک تیغه موجبر نیمرسانای طویل با سطح مقطع مستطیلی به پهنای w و ارتفاع h کمتر از نیم طول موج، است.



شکل ۱: طرحواره یک نانوباریکه بلور فوتونی، که دارای آرایه تناوبی از حفره های- هوا در یک تیغه موجبر نیمرسانای طویل با سطح مقطع مستطیلی به پهنای w و ارتفاع h کمتر از نیم طول موج، است.

یک نانوکاوک را می توان با برهم زدن نظم در آرایش تناوبی حفره های- هوا و ایجاد نقص، در مرکز موجبر بلور فوتونی ایجاد نمود [۲-۵]. این نقص، می تواند به طور ساده به صورت جابجا شدگی چند حفره هوا در جهت دور شدن از مرکز کاواک باشند، و یا مثلاً مطابق شکل ۱، از حذف یک حفره- هوا از چینگ شدن (علامت گذاری شده با ضربدر) بدست آید که فضای ایجاد شده، نانوکاوک را تشکیل می دهد. اندازه موجبر و ابعاد شبکه بلور فوتونی طوری طراحی شده اند که مد منتشر شده در موجبر در ناحیه گاف نواری انرژی بلور فوتونی متشکله قرار گیرد.

نور در درون نانوکاوک بر دو مبنا محدود می شود؛ در امتداد محور موجبر، توسط آرایش دوره ای حفره های هوا (بازتاب پراگ) که منشاء گاف نواری فوتونیک ساختار است، و در جهت عمود بر موجبر توسط اختلاف ضریب

شکست در سطح مشترک هوا-نیمرسانا-هوا در طرفین و بالا و پایین (بازتاب داخلی کلی) [۶-۹، ۱].

از پارامترهای مهم در این نوع ساختارها، فاکتور کیفیت (Q) مدها است؛ که کمیتی بدون بعد بوده و چگونگی محدود شدن فوتون ها درون کاواک را به خوبی توصیف نموده و برای محاسبه آن، از رابطه (۱) استفاده می شود:

$$Q = \omega_0 / \Delta\omega \quad (1)$$

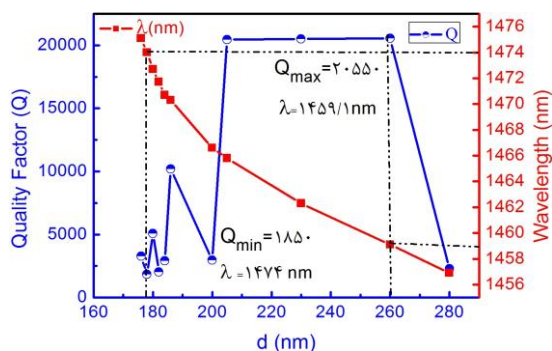
که ω_0 فرکانس تشدید مد و $\Delta\omega$ پهنا قله مد در نصف ارتفاع ماکزیمم است [۷-۵].

۲- نانوباریکه بلور فوتونی با حفره های باریک شده

ساختار نانوباریکه بلور فوتونی در این مقاله، شامل یک ردیف از حفره های- هوا است که در طول یک موجبر فوتونی به پهنای 500 nm ایجاد شده و دارای ضریب شکست مؤثر $3/19$ می باشد.

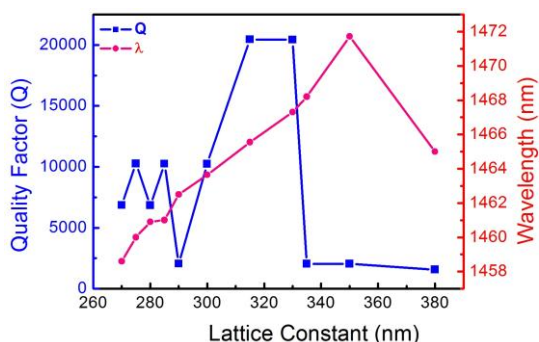
در این مقاله، قطبش TE مورد مطالعه بوده است. مقادیر فاکتور کیفیت زیاد بدست آمده، وابسته به انتخاب صحیح پارامتر حفره ها، که شامل قطر حفره ها، فاصله دوره ای حفره های آینه ای، اندازه مختلف ثابت شبکه و قطر حفره ها در بخش باریک شده و طول کاواک است. تعداد حفره های دوره ای باریک شده در اطراف کاواک (N_{TI}) به ۴ عدد بهینه سازی شده است. ساختار در نظر گرفته شده، شامل یک تک حفره باریک شده در ناحیه دور از کاواک ($N_{TO}=1$) در طرفین و آینه ها شامل ۴ حفره دوره ای با قطر (d)، 180 nm و ثابت شبکه (a)، 350 nm ، می باشد. مقدار فاکتور کیفیت 3440 محاسبه گردیده و طول موج مد تشدید $1583/9 \text{ nm}$ و پهنا در نصف ارتفاع ماکزیمم قله مد (FWHM) $0/46 \text{ nm}$ ، برای کاواکی به طول 390 nm بدست آمده است. برای کاواک هایی به طول 415 nm ، 440 nm ، 465 nm ، 490 nm ، مقادیر فاکتور کیفیت محاسبه شده به ترتیب 3500 ، 2800 ، 2210 ، 1010 بدست آمده است. با توجه به شکل ۲، فاکتور کیفیت با تغییر طول کاواک از 390 nm تا 415 nm افزایش و از 415 nm تا 490 nm کاهش یافته است. همچنین، برای کاواک هایی با طول مختلف با افزایش گام های 25 nm ، جابه جایی غیریکنواخت مد محبوس به سمت طول موج های کوچکتر به ترتیب $1558/6$ ، $1532/4$ ، $1506/8$ و $1483/2$ نانومتر مشاهده می شود.

این وضعیت، فاکتور کیفیت به ازای قطرهای تا ۲۰۰ نانومتر، تغییرات نوسانی داشته و بعد از آن افزایش و تثبیت یافته و در $d=280$ nm مقدار آن دوباره کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار فاکتور کیفیت حدود ۲۰۵۵۰ در طول موج ۱۴۵۹/۱ nm و کم‌ترین مقدار آن ۱۸۵۰ در طول موج ۱۴۷۴ اتفاق می‌افتد.



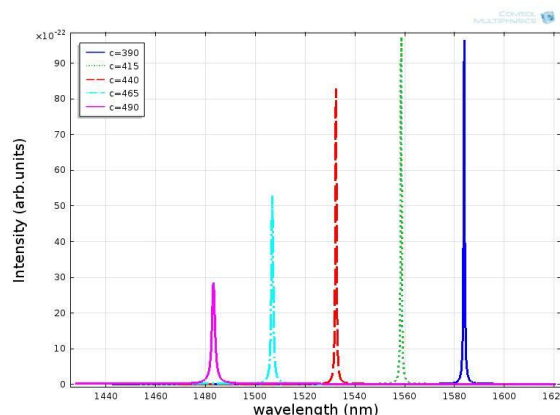
شکل ۴: تغییرات طول موج و فاکتور کیفیت مد پایه بر حسب تغییرات قطر حفره-هوا در آینه با تعداد $N=5$.

در شکل ۵، نمودار وابستگی افزایشی طول موج مد پایه بر حسب تغییرات ثابت شبکه حفره‌ها در آینه‌های طرفین را نشان می‌دهد. افزایش طول موج تا ثابت شبکه ۳۵۰ nm ادامه یافته و فقط در مرحله پایانی کاهش می‌یابد، که دلیل آن را می‌توان به تغییر مرتبه مد نسبت داد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، فاکتور کیفیت مد پایه در ناحیه $a=310-330$ nm، دارای مقادیر افزایش یافته‌ای با مقدار بیشینه تقریباً ۲۰۴۳۰ در طول موج ۱۴۶۵/۵۵، به ازای $a=315$ nm می‌باشد.



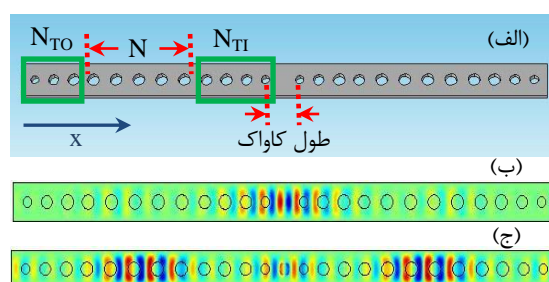
شکل ۵: تغییرات طول موج تشدید و فاکتور کیفیت مد پایه بر حسب تغییرات ثابت شبکه حفره‌ها در آینه‌های طرفین با $N_{TO}=4$ و $N=5$.

برای مد دوم هم همانطوری که در شکل ۶ نشان داده شده، با افزایش قطر حفره‌ها در آینه‌ها، طول موج مد‌ها



شکل ۶: طیف شدت و طول موج‌های مدهای شبه‌سازی شده برای کاواک‌هایی با طول ۳۰۰ الی ۴۹۰ نانومتر، با انتخاب بهینه $N=4$ ، $N_{TO}=1$.

در شکل ۳-الف، طرحواره یک نانوباریکه بلور فوتونی با سه حفره-هوا باریک شده در ناحیه دور از کاواک ($N_{TO}=3$) و در شکل ۳-ب و ج، الگوی دوبعدی مؤلفه S_x بردار پوینتینگ مد پایه و مد مرتبه دوم با استفاده از نرم‌افزار کامسول با روش المان محدود در حوزه فرکانس، نشان داده شده است.



شکل ۳: الف) طرحواره ساختار یک نانوباریکه بلور فوتونی با $N=5$ ، طول کاواک ۴۴۰ nm، $N_{TO}=3$ و $N_{TI}=4$ ؛ الگوی دو بعدی S_x (ب) مد پایه (ج) مد مرتبه دوم.

همانطور که در شکل دیده می‌شود، مد پایه دارای الگوی شدت‌های ماکزیمم در ناحیه میانی کاواک بوده در حالی که شدت موج برای مد مرتبه دو در این ناحیه میانی کاهش یافته ولی تمرکز آن در ناحیه آینه‌های طرفین واقع می‌گردد.

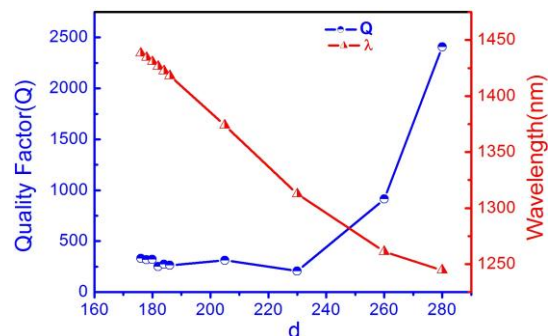
در ادامه تحقیق، برای ساختار $N_{TO}=4$ و $N=5$ ، قطر پنج حفره-هوا در آینه دو طرف کاواک تغییر داده شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطوری که دیده می‌شود، با افزایش قطر حفره‌ها تا $d=280$ nm، روند کاهشی برای طول موج‌های مد پایه مشاهده می‌شود. در

تغییر قطرهای حفره-هوا بسیار حساس هستند و با تغییری کوچک در قطر حفره‌ها، فاکتور کیفیت به میزان زیادی تغییر می‌یابد؛ بنابراین بهینه‌سازی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. فاکتور کیفیت ماکزیمم ساختار مورد بررسی قبل از بهینه‌سازی، دارای مقداری در حدود ۳۵۰۰ بوده و هنگامی که ثابت شبکه و شعاع حفره‌های مجاور کاواک نانوباریکه و طول کاواک تغییر داده شد، باعث کاهش اتلاف شده و در نتیجه فاکتور کیفیت به مقدار بسیار قابل اشاره‌ای در حدود ۲۰۵۵۰ افزایش یافت. تغییر تعداد سری حفره-هوای باریک‌شونده انتهایی از $N_{TO}=1$ به دو، سه، و چهار و همچنین افزایش تعداد حفره‌ها در آینه‌ها، منجر به مزید کاهش پراکندگی شده و اگرچه به‌طور ضمنی و جزئی حجم مدی واقعی کاواک را کمی می‌افزاید، نهایتاً باعث افزایش قابل ملاحظه فاکتور کیفیت گردیده است.

مراجع

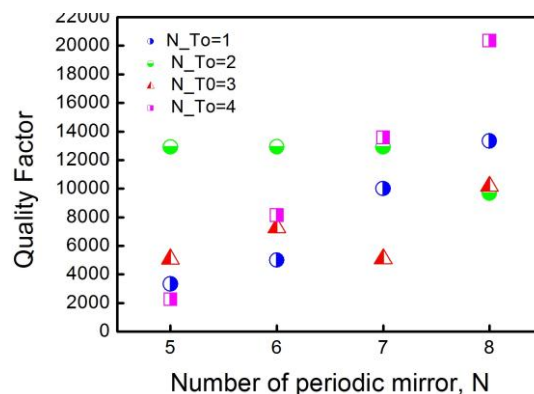
- [1] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, *Photonic Crystals - Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, 2nd Ed. (2008).
- [2] R. Ohta et al., Strong coupling between a photonic crystal nanobeam cavity and a single quantum dot, *Appl. Phys. Lett.*, 98, 173104 (2011).
- [3] Y. Gong et al., *Nanobeam photonic crystal cavity quantum dot laser*, *Optics Express*, 18, No.9, 8781-8789 (2010).
- [4] B-H. Ahn, J-H. Kang, M-K. Kim, j-h. Song, B. Min, K-S. Kim, and Y-H. Lee., *One dimensional parabolic-beam photonic crystal laser*, *Optics Express*, 18, No. 6, 5654-5660 (2010).
- [5] M. Lončar et al., *High Quality Factor Photonic Crystal Nanobeam Cavities and Their Applications*, Conference IPNRA, Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications (2009).
- [6] P. B. Deatare, M. W. McCutcheon, I. W. Frank, M. Khan et al., *Coupled photonic crystal nanobeam cavities*, *Appl. Phys. Lett.*, 95, 031102 (2009).
- [7] S. Meesala, *Photonic crystal nanobeam cavities physics, fabrication, experiments and applications*, Harvard School of Engineering and Applied Sciences (2011).
- [8] C. Schriever, C. Bohely, J. Schilling, *Numerical investigation of taper parameters for high Q infiltrated nanobeam slot microcavities*, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications* 10, 312-318 (2012).
- [9] P. Velha, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji, J. C. Rodier, P. Lalanne, D. Peyrade, *Ultra-High Q/V Fabry- Pérot microcavity on SOI substrate*, *Optics Express*, 15, No. 24, 16090-16096 (2007).

کاهش می‌یابد، ولی فاکتور کیفیت روند افزایشی را تا میزان حدود ده برابر، طی می‌کند.



شکل ۶: تغییرات طول موج و فاکتور کیفیت مد دوم برحسب تغییرات قطر حفره‌ها آینه‌ای با $N = 5$.

در شکل ۷، مقدار فاکتور کیفیت برحسب تعداد حفره-هوای دوره‌ای مندرج در آینه‌ها برای یک، دو، سه یا چهار حفره باریک‌شده در ناحیه دور از کاواک نشان داده شده است. برای $N_{TO} = 4$ و با افزایش تعداد حفره-هوای آینه‌ها از ۵ به ۸، روند بهینه‌سازی مقدار فاکتور کیفیت با افزایش قابل ملاحظه تا حدود ۱۰ برابر دیده می‌شود، و این در حالی است که برای $N_{TO} = 3$ و ۲ مقدار فاکتور کیفیت اگرچه با مقادیر زیادتر و قابل اشاره‌ای آغاز گردیده، ولی دارای افت‌وخیز و حتی کاهش نیز است.



شکل ۷: فاکتور کیفیت بر حسب تعداد آینه‌های دوره‌ای برای یک الی ۴ حفره باریک‌شده در ناحیه دور از کاواک

$$. a = 35 \cdot nm, c = 44 \cdot nm, d = 182 \cdot nm$$

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، افزایش مقادیر فاکتور کیفیت نانوکاواک‌های متشکله در ساختار نانوباریکه بلور فوتونی و بهینه‌سازی آن، مورد بررسی قرار گرفته است. بلورهای فوتونی به