بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

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

عاطفه محسنی‌فرد 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 بلورفوتونی، 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 نرم افزار *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 Ahmadreza 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.

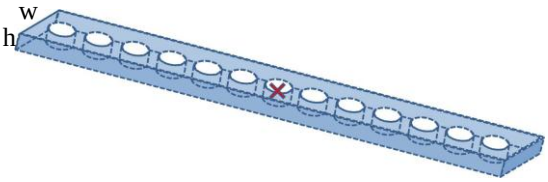
Keywords: Nanobeam, Photonic Crystal, Quality Factor, Air-Holes Taper, COMSOL Multiphysics

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

۱-مقدمه

نانوکاواک‌های بلور فوتونی ایجاد شده در محیطی شامل دی‌الکتریک- نیمرسانا، نور را در حجم کوچکی در مقیاس کسری از مکعب طول‌موج نور در محیط، محبوس می‌کنند[۱]. فاکتور کیفیت بسیار بزرگ مدها و حجم مدی کوچک در این نانوساختارها، کاربردهای جدید و گسترده‌ای را در حیطه‌های مختلف مانند لیزرهای با آستانه پایین، اپتیک غیرخطی، تحقق آزمایشات الکترودینامیک کوانتومی کاواک در محیط مواد حالت جامد و فیبر مخابرات نوری دارند[۴-۲].

ساختار نانوباریکه بلور فوتونی، همان‌طوری که در طرحواره شکل۱ نشان داده شده، دارای آرایه تناوبی از حفره‌های- هوا (air-holes) در یک تیغه موجبر نیمرسانای طویل با سطح مقطع مستطیلی به پهنای w و ارتفاع h کمتر از نیم‌طول‌موج، است.



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

یک نانوکاواک را می‌توان با برهم‌زدن نظم در آرایش تناوبی حفره‌های- هوا و ایجاد نقص، در مرکز موجبر بلور فوتونی ایجاد نمود[۵-۲]. این نقص، می‌تواند به طور ساده به صورت جابجا شدگی چند حفره هوا در جهت دور شدن از مرکز کاواک باشند، و یا مثلاً مطابق شکل۱، از حذف یک حفره- هوا از اچینگ شدن (علامت‌گذاری شده با ضربدر) بدست آید که فضای ایجاد شده، نانوکاواک را تشکیل می‌دهد. اندازه موجبر و ابعاد شبکه بلور فوتونی طوری طراحی شده‌اند که مد منتشر شده در موجبر در ناحیه گاف نواری انرژی بلور فوتونی متشکله قرار گیرد.
نور در درون نانوکاواک بر دو مبنا محدود می‌شود؛ در امتداد محور موجبر، توسط آرایش دوره‌ای حفره‌های هوا (بازتاب براگ) که منشاء گاف نواری فوتونیکی 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)[۹-۶ ,۱].
از پارامترهای مهم در این نوع ساختارها، فاکتور کیفیت (Q) مدها است؛ که کمیتی بدون بعد بوده و چگونگی محدود شدن فوتون‌ها درون کاواک را به خوبی توصیف نموده و برای محاسبه آن، از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

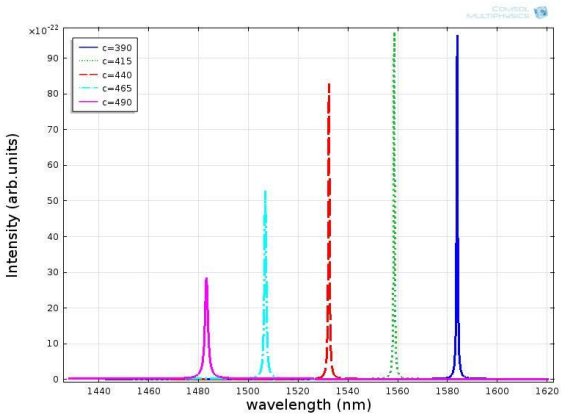
$$Q = \omega_0 / \Delta\omega \qquad (۱)$$

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

۲-نانوباریکه بلورفوتونی با حفره‌های باریک‌شده

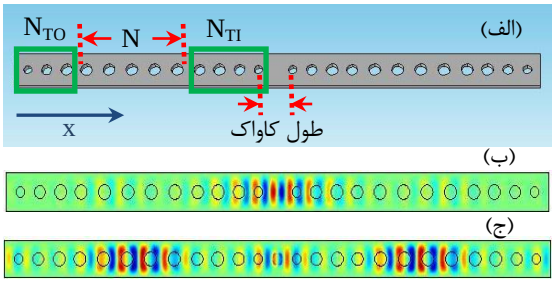
ساختار نانوباریکه بلورفوتونی در این مقاله، شامل یک ردیف از حفره‌های-هوا است که در طول یک موجبر فوتونی به پهنای ۵۰۰ nm ایجاد شده و دارای ضریب شکست مؤثر ۳/۱۹ می‌باشد.
در این مقاله، قطبش TE مورد مطالعه بوده است. مقادیر فاکتور کیفیت زیاد بدست آمده، وابسته به انتخاب صحیح پارامتر حفره‌ها، که شامل قطر حفره‌ها، فاصله دوره‌ای حفره‌های آینه‌ای، اندازه مختلف ثابت شبکه و قطرحفره‌ها در بخش باریک شده و طول کاواک است. تعداد حفره‌های دوره‌ای باریک‌شده در اطراف کاواک (N_{TI}) به ۴ عدد بهینه‌سازی شده است. ساختار در نظر گرفته شده، شامل یک تک حفره باریک شده در ناحیه دور از کاواک (N_{TO}=۱) در طرفین و آینه‌ها شامل ۴ حفره دوره‌ای با قطر (d)، ۱۸۰ nm و ثابت شبکه (a)، ۳۵۰ nm، می‌باشد. مقدار فاکتور کیفیت ۳۴۴۰ محاسبه گردیده و طول‌موج مد تشدید ۱۵۸۳/۹ nm و پهنا در نصف ارتفاع ماکزیمم قله مد (FWHM) ۰/۴۶ nm، برای کاواکی به طول ۳۹۰nm بدست آمده است. برای کاواک‌هایی به طول ۴۱۵ nm، ۴۴۰ nm، ۴۶۵ nm، ۴۹۰ nm، مقادیر فاکتور کیفیت محاسبه شده به ترتیب ۳۵۰۰، ۲۸۰۰، ۲۲۱۰، ۱۰۱۰ بدست آمده است. با توجه به شکل۲، فاکتور کیفیت با تغییر طول کاواک از ۳۹۰ nm تا ۴۱۵ nm افزایش و از ۴۱۵ nm تا ۴۹۰ nm کاهش یافته است. همچنین، برای کاواک‌هایی با طول مختلف با افزایش گام‌های ۲۵ nm، جابه‌جایی غیریکنواخت مد محبوس به سمت طول‌موج‌های کوچکتر به‌ترتیب ۱۵۵۸/۶، ۱۵۳۲/۴، ۱۵۰۶/۸و ۱۴۸۳/۲ نانومتر مشاهده می‌شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل ۲: طیف شدت و طول‌موج‌های مدهای شبیه‌سازی شده برای کاواک‌هایی با طول ۳۰۰ الی ۴۹۰ نانومتر، با انتخاب بهینه N=۴ ، N_{TO}=۱.

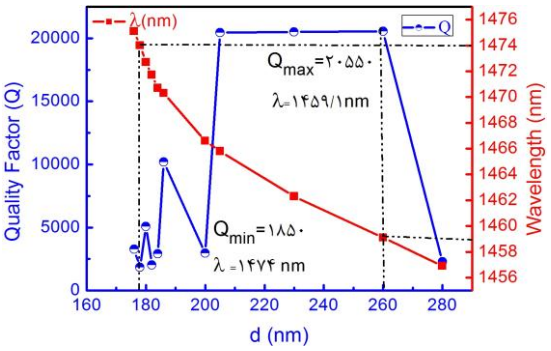
در شکل ۳-الف، طرحواره یک نانوباریکه بلورفوتونی با سه حفره-هوای باریک شده در ناحیه دور از کاواک (N_{TO}=۳) و در شکل ۳-ب و ج، الگوی دوبعدی مؤلفه S_x بردار پوئینتینگ مد پایه و مد مرتبه دوم با استفاده از نرم‌افزار کامسول با روش المان محدود در حوزه فرکانس، نشان داده شده است.



شکل ۳: الف) طرحواره ساختار یک نانوباریکه بلور فوتونی با N=۵، طول کاواک ۴۴۰ nm، N_{TI}=۴ و N_{TO}=۳ ؛ الگوی دو بعدی S_x ب) مد پایه ج) مد مرتبه دوم.

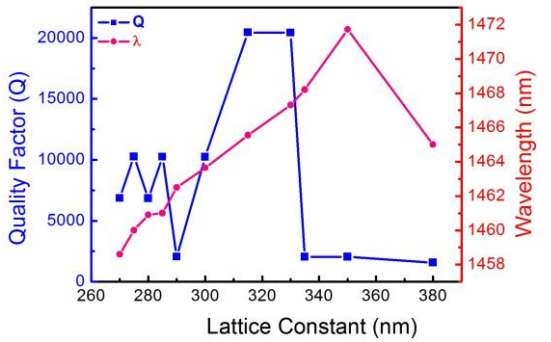
همانطور که در شکل دیده می‌شود، مد پایه دارای الگوی شدت‌های ماکزیمم در ناحیه میانی کاواک بوده در حالی که شدت موج برای مد مرتبه دو در این ناحیه میانی کاهش یافته ولی تمرکز آن در ناحیه آینه‌های طرفین واقع می‌گردد.

در ادامه تحقیق، برای ساختار N_{TO}=۴ و N=۵ ، 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=۲۸۰ nm، روند کاهشی برای طول‌موج‌های مد پایه مشاهده می‌شود. در این وضعیت، فاکتور کیفیت به ازای قطرهای تا ۲۰۰ نانومتر، تغییرات نوسانی داشته و بعد از آن افزایش و تثبیت یافته و در d=۲۸۰ nm مقدار آن دوباره کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار فاکتور کیفیت حدود ۲۰۵۵۰ در طول‌موج ۱۴۵۹/۱ nm و کم‌ترین مقدار آن ۱۸۵۰ در طول‌موج ۱۴۷۴ اتفاق می‌افتد.



شکل ۴: تغییرات طول‌موج و فاکتور کیفیت مد پایه برحسب تغییرات قطر حفره-هوا در آینه با تعداد N=۵.

در شکل ۵، نمودار وابستگی افزایشی طول‌موج مد پایه برحسب تغییرات ثابت شبکه حفره‌ها در آینه‌های طرفین را نشان می‌دهد. افزایش طول‌موج 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=۳۱۰-۳۳۰ nm، دارای مقادیر افزایش‌یافته‌ای با مقدار بیشینه تقریبا ۲۰۴۳۰ در طول‌موج ۱۴۶۵/۵۵، به ازای a=۳۱۵ nm می‌باشد.

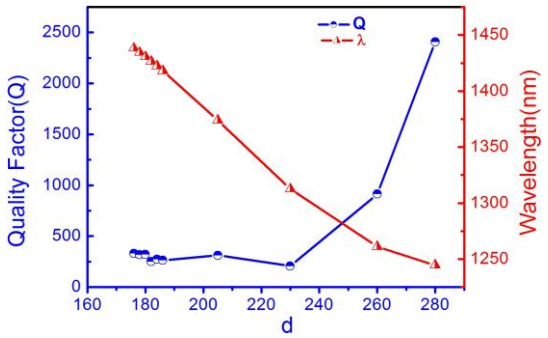


شکل ۵: تغییرات طول‌موج تشدید و فاکتور کیفیت مد پایه بر حسب تغییرات ثابت شبکه حفره‌ها در آینه‌های طرفین با N_{TO}=۴ و N=۵.

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

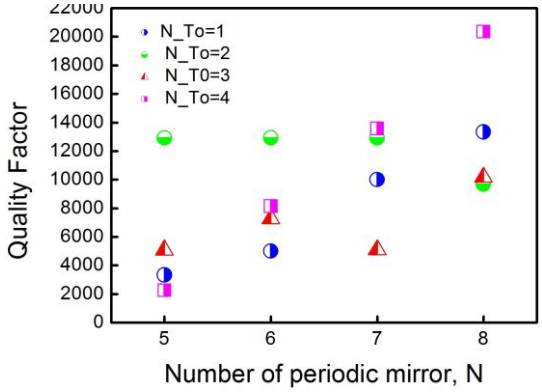
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

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



شکل۶: تغییرات طول‌موج و فاکتور کیفیت مد دوم برحسب تغییرات قطر حفره‌ها آینه‌ای با $N = ۵$.

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 $N_{TO} = ۱$و۴، 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 $N_{TO} = ۲$و۳ 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 ازکاواک و $a = ۳۵۰nm$ ، $c = ۴۴۰nm$ ، $d = ۱۸۲nm$.

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 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 هنگامی‌که 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).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]