بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی میکروکاواک شبه بلور فوتونی با ضریب کیفیت بالا

غلامرضا مصلی نژاد[۱]، علی اکبر ابن علی حیدری [۲] و مجید ابن علی حیدری[۱] و محمد کاظم مروج فرشی[۳]

۱. شهرکرد، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه الکترونیک
۲. اصفهان، دانشگاه فرهنگیان
۳. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه الکترونیک

چکیده – در این تحقیق، یک میکروکاواک شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه با هدف دستیابی به بالاترین ضریب کیفیت از طریق بهینه‌سازی مشخصات ساختار مطالعه شده است. ساختار ارائه‌شده از دو شبکه شبه بلور فوتونی با پارامترهای هندسی متفاوت تشکیل‌شده است. با چندین مرحله بهینه‌سازی ساختار، بالاترین ضریب کیفیت به مقدار $۸/۱۶ \times ۱۰^{۷}$ در طول‌موج ۱۰۴۰ نانومتر به دست می‌آید که طول‌موج مطلوب برای لیزرهای فمتوثانیه محسوب می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های این ساختار، بهبود همزمان ضریب کیفیت آن همراه با کمترین میزان تغییرات در طول‌موج ۱۰۴۰ نانومتر است.

کلیدواژه – بهینه‌سازی، شبه بلور، ضریب کیفیت بالا، میکروکاواک

کد PACS – ۲۳۰.۰۲۳۰

Design of Quasi periodic microcavity with high quality factor

G. Mosallanezhad [1], A. Ebnali-Heidari [2], and M. Ebnali-Heidari [1], M.K. Moravvej-Farshi [3]

1. Faculty of Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2. Farhangyan University, Isfahan, Iran

3. Dept. of Electrical Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract - In this paper, we propose an optimized quasi periodic microcavity with the aim of achieving the highest quality factor. The proposed structure consists of two quasicrystal rings with different geometries. With performing several optimizations to the structure, the highest quality factor of 8.16×10^{7} for femtosecond laser with wavelength of 1040 nm can be achieved. The most important characteristics of this structure is simultaneously improvement of the quality factor and stability cavity wavelength.

Keywords: high quality factor, microcavity, optimization, Quasi periodic

PACS No: 230.0230

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانوفوتونیک و مهندسی ساختارهای فوتونیکی، امکان محصورسازی نور در مقیاس طول‌موج در کاواک‌های با ضریب کیفیت بالا و حجم مدی پایین فراهم شده است [۱]. این دستاوردها تاکنون کاربردهای متنوعی مانند کاواک الکترودینامیک کوانتومی [۲]، کنترل نشر خود به خودی [۳] و لیزرهای با توان آستانه بسیار پایین [۴] را فراهم آورده است. در برخی از این کاربردها، ساختار فوتونیکی باید طوری بهینه شود که بزرگ‌ترین گاف نواری یا بیشترین کیفیت مدهای کاواک در تک فرکانس را ایجاد کند. ساختارهایی که شامل چندین گاف نواری یا مدهای کاواک هستند، برای مطالعه برهم‌کنش‌های اپتیک غیرخطی مفید هستند. ازاین‌رو، مطالعه کاواک‌های با ضریب کیفیت بالا و حجم مدی پایین در افزاره‌های فوتونیکی از موضوعات موردتوجه محققین است. میکروکاواک‌های بلور فوتونی نوعی از آرایه‌های مصنوعی محسوب می‌شوند که توانایی محصورسازی نور توسط گاف نواری یا مدهای کاواک دارند [۵].

ساختارهای متناوب نقشی اساسی در پژوهش‌های تراگسیل و تداخل امواج نوری ایفا می‌کنند. فاصله گرفتن از تناوب ساختاری سبب پیدایش پیچیدگی‌ها و آثار شگفت‌انگیز متعددی می‌شود. شبه بلورهای فوتونی یکی از این ساختارها محسوب می‌شوند که در مقایسه با شبکه‌های متناوب بلور فوتونی دارای ویژگی‌های متمایزی نظیر تقارن کروی و نظم بلند برد هستند.

شبه بلورهای فوتونی در سال ۱۹۸۴ توسط Shechtman کشف شد و با هدف دستیابی به پایه و اساس آن مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت [۶] . رایج‌ترین شبه بلور فوتونی دوبعدی توسط Penrose با تقارن کروی ۱۰ گانه ارائه شد [۷]. در شبکه های شبه بلورهای فوتونی گاف نواری توسط ناحیه pseudo-Jones تعریف می‌شود [۸]. با افزایش تقارن کروی این ناحیه، گاف نواری فوتونی کاملی در شبکه‌های دو و سه‌بعدی ایجاد می‌شود [۹]. شبکه‌های شبه تناوبی بلورهای فوتونی با کارکردهایی نظیر شبکه‌های متناوب می‌توانند با تضاد ثابت دی‌الکتریک کوچک‌تر، گاف نواری فوتونی کاملی را ایجاد کنند [۱۰]. برای تحلیل ساختارهای شبه بلور فوتونی از روش تفاضل متناهی در حوزه زمان (FDTD) استفاده میشود که روشی توانمند در حل معادلات ماکسول در حوزه زمان محسوب می‌شود [۱۱].

تاکنون، از روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی ضریب کیفیت کاواک استفاده شده است. در سال ۲۰۰۹ ساختار یک‌بعدی میکروکاواک بلور فوتونی با بیشینه ضریب کیفیت $۱/۴ \times ۱۰^{۷}$ توسط حذف ۵ حفره مرکزی ساختار گزارش شد [۱۲]. با پیدایش شبه بلورهای فوتونی، روش‌های مشابه بلورهای فوتونی برای بهبود ضریب کیفیت کاواک دنبال شد. بر اساس آخرین تحقیقات به‌عمل‌آمده در سال ۲۰۱۱، شبکه‌ای ۱۲ گانه از میکروکاواک دوبعدی شبه بلور فوتونی با ضریب کیفیت معادل ۲×۱۰^{۶} توسط حذف حفره مرکزی و جابجایی حفره‌های مجاور آن در طول‌موج ۱۵۵۰ نانومتر با بیشینه ضریب کیفیت $۱/۶۵ \times ۱۰^{۷}$ ارائه شد [۱۳].

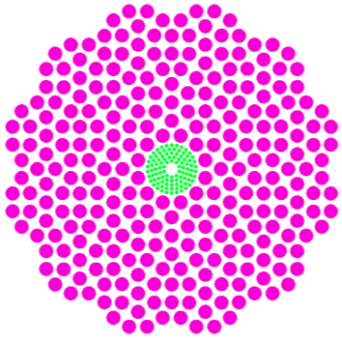
در این تحقیق یک میکروکاواک دوبعدی شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه با رویکرد کاربردی لیزرهای فمتوثانیه در محدوده طول موجی ۱۰۴۰ تا ۱۰۵۷ نانومتر موردمطالعه قرارگرفته است. این بازه از طول موج تاکنون در بسیاری از لیزرهای فمتوثانیه با کاربردهای صنعتی و پزشکی به کار گرفته شده است. این ساختار از دو شبکه شبه بلور فوتونی با هندسه‌های متفاوت تشکیل‌شده است. با بهینه‌سازی ۷ مرحله‌ای ساختار و اصلاح پارامترهایی که به‌تفصیل در مورد آن‌ها اشاره خواهد شد، بالاترین ضریب کیفیت به میزان $۸/۱۶ \times ۱۰^{۷}$ به دست آمده است. سرانجام یک ساختار بهینه‌شده با بالاترین ضریب کیفیت به‌دست‌آمده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این کاواک، بهبود ضریب کیفیت به همراه کمترین تغییرات آن در طول‌موج کاری لیزرهای فمتوثانیه است. شایان‌ذکر است که ضریب کیفیت به‌دست‌آمده در این طول‌موج تابه‌حال گزارش نشده است.

۲- ساختار میکروکاواک شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه اصلاح یافته

نمایش دوبعدی از سطح مقطع ساختار میکروکاواک شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه پیشنهادی در این مقاله در شکل (۱- الف) نشان داده شده است که تعمیمی از ساختار ارائه‌شده در مرجع [۱۳] است. این ساختار با استفاده از قواعد

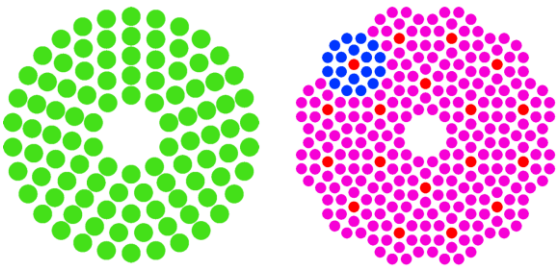
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

ریاضی دکارتی کد نویسی شده است و شامل ۲ شبکه شبه بلور فوتونی داخلی و خارجی است که درشکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ – (الف) ساختار اصلاح یافته اولیه میکروکاواک تشکیل‌شده از دو شبکه داخلی (inner - سبز) و خارجی (outer - بنفش) شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه.

همان‌گونه که در شکل ۲ (الف) پیداست، در این شبکه حفره مرکزی و حلقه اول شبکه شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه حذف گردیده است. شعاع‌های این شبکه R=0.37a و ثابت شبکه آن ۳۹۰ نانومتر است. شبکه داخلی ساختار شبه بلور فوتونی در شکل ۲ (ب) مشخص‌شده است. در این شبکه شعاع‌ها R=0.47a و ثابت شبکه آن ۸۴ نانومتر است. حفره مرکزی و اولین حلقه این ساختار حذف شده است.



(ب) (الف)

شکل ۲ – (الف) ساختار اولیه شبکه خارجی (outer) و (ب) شبکه داخلی (inner) شبه بلور فوتونی.

۳- بهبود ضریب کیفیت با الگوریتم PSO

مشخصات میکروکاواک با بهینه‌سازی پارامترهای مختلف ساختار توسط الگوریتم بهینه‌سازی Particle Swarm (PSO) اصلاح یافته‌اند. پارامترهایی که برای بهینه‌سازی مشخصات میکروکاواک استفاده شده است، عبارت‌اند از: (۱) شعاع‌های حفره‌های شبکه خارجی ساختار (۲) شعاع‌های حفره‌های شبکه داخلی ساختار، (۳) مدت‌زمان انتشار نور در ساختار (۴) ضریب شکست ماده بستر میکروکاواک (۵) توان منبع نور ورودی. به این منظور، ۷ مرحله بهینه‌سازی، با رویکرد افزایش ضریب کیفیت انجام خواهد شده است. نتایج بهینه‌سازی‌ها در مرحله‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده‌شده است. به‌کارگیری هندسه بیضوی برای حفره‌ها در ساختارهای بلور فوتونی و شبه بلور فوتونی باعث افزایش گاف نواری فوتونی می‌شود [۱۴].

به‌منظور اندازه‌گیری دقیق ضریب کیفیت، اندازه مش در محورهای x و y به میزان 0.02a و شرایط مرزی لایه کاملاً جاذب PML با کمترین بازتاب در نظر گرفته‌شده است. ضریب کیفیت به مقدار قابل‌توجهی نسبت به مقادیری که در مرجع [۱۳] به‌دست‌آمده است، افزایش می‌یابد. در این پژوهش با توجه به رویکرد کاربردی لیزرهای فمتوثانیه، مقدار بهینه ضریب کیفیت به $۸/۱۶ \times ۱۰^{۷}$ با نیم بیشینه تمام عرض ۲۲۰ فمتوثانیه در طول‌موج ۱۰۴۰ نانومتر به دست آمده است.

مرحله ۷ با کمترین مقدار تغییرات ضریب کیفیت و مرحله ۵ با در نظر گرفتن زمان انتشار بهینه، بهترین گزینه‌ها برای به‌کارگیری این میکروکاواک شبه بلور فوتونی در لیزرهای فمتوثانیه محسوب می‌شوند. ضریب شکست بهینه‌شده ماده بستر در هر دو مرحله ۳.۳۹ به‌دست‌آمده است؛ این ضریب شکست معادل ماده GaAs است.

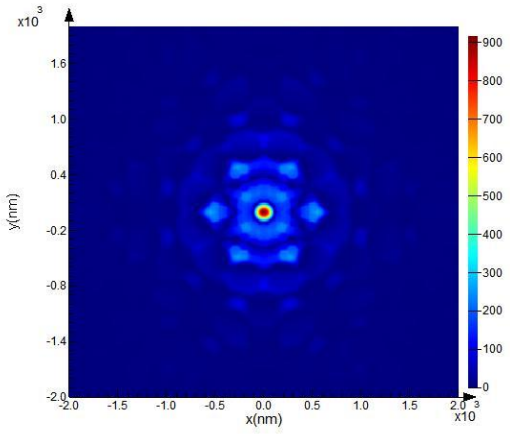
جدول ۱ - مقادیر بهینه‌شده ضریب کیفیت

No.	Opt. Value	Q	ΔQ	λ (nm)
1	$R_{1\ outer}$ = 0.38 a $R_{2\ outer}$ = 0.39 a	3.59×10^{7}	98×10^{4}	1053
2	$R_{1\ inner}$ = 0.48 a $R_{2\ inner}$ = 0.47 a	3.67×10^{7}	26×10^{4}	1053
3	$R_{1\ outer}$ = 0.37 a $R_{2\ outer}$ = 0.38 a	4.81×10^{7}	74×10^{4}	1056
4	n = 3.39	4.93×10^{7}	43×10^{4}	1057
5	**t = 7100 fs**	$\mathbf{7.60\times10^{7}}$	$\mathbf{35\times10^{4}}$	**1040**
6	**P = 850 nW/m**	$\mathbf{8.16\times10^{7}}$	$\mathbf{53\times10^{5}}$	**1040**
7	**t = 15 ps**	$\mathbf{7.43\times10^{7}}$	$\mathbf{30\times10^{3}}$	**1040**

توزیع میدان مرحله ۶ در شکل ۳ نشان داده‌شده است. در محاسبات ضریب کیفیت کاواک ممکن است چندین مد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

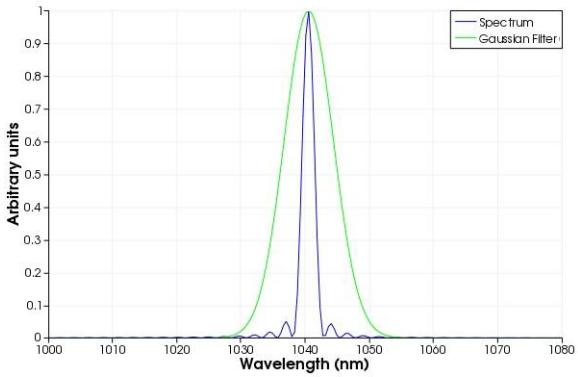
تشدید وجود داشته باشد که ممکن است در دامنه زمانی تداخل داشته باشند. ازاین‌رو باید هر تشدید در دامنه فرکانسی با استفاده از فیلتر گاوسی جداسازی شود (شکل ۴) تا بتوان با استفاده از تبدیل فوریه معکوس زمان میرایی و درنهایت ضریب کیفیت را برای هر تشدید محاسبه کرد.



(الف)

شکل ۳ – (الف) توزیع میدان برای تشدید مرحله ۶ بهینه‌سازی.

همانگونه که از نمودار ۴ قابل مشاهده است، پیک تشدید در طول موج ۱۰۴۰ نانومتر قرار دارد. مشخصه مهم این ساختار میکروکاواک شبه بلور فوتونی، بالا بودن ضریب کیفیت آن در محدوده طول‌موج کاری لیزرهای فمتوثانیه ۱۰۴۰ نانومتر است؛ این مقدار ضریب کیفیت تقریباً ۴۱ برابر ضریب کیفیت به دست آمده در مرجع [۱۳] است.



شکل ۴ – پیک تشدید در دامنه فرکانسی و فیلتر گاوسی متناظر با آن در مرحله ۶ بهینه‌سازی.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار میکروکاواک اصلاح‌شده شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه ارائه‌شده است. ساختار ارائه‌شده دارای ضریب کیفیت بالا به همراه نرخ تغییرات پایین است که می‌تواند در اپتیک مجتمع، لیزرهای فمتوثانیه و غیره استفاده شود. در این راستا، مشخصات ساختار با رویکرد افزایش ضریب کیفیت میکروکاواک در طول‌موج ۱۰۴۰ نانومتر توسط الگوریتم PSO بهینه‌سازی و آثار بهینه‌سازی پارامترهای مختلف روی ضریب کیفیت بررسی‌شده است.

مراجع

[1] M. T. Rakher, N. G. Stoltz, L. A. Coldren, P. M. Petroff, and D. Bouwmeester, *"Externally Mode-Matched Cavity Quantum Electrodynamics with Charge-Tunable Quantum Dots,"* **Phys. Rev. Lett.** 102, 097403, (2009).

[2] K. Hennessy, A. Badolato, M. Winger, D. Gerace, M. Atatüre, S. Gulde, S. Fält, E. L. Hu and A. Imamoğlu, *"Quantum nature of a strongly coupled single quantum dot–cavity system,"* **Nature** 445, 896-899, (2007).

[3] K. Nozaki, S. Kita, and T. Baba, *"Room temperature continuous wave operation and controlled spontaneous emission in ultrasmall photonic crystal nanolaser,"* **Opt. Express** 15, 7506-7514, (2007).

[4] J. Wiersig, C. Gies, F. Jahnke, M. Aßmann, T. Berstermann, M. Bayer, C. Kistner, S. Reitzenstein, C. Schneider, and D. Hommel, *"Direct observation of correlations between individual photon emission events of a microcavity laser"* **Nature** 460, 245-249, (2009).

[5] F. Gourdon, M. Chakaroun, N. Fabre, J. Solard, E. Cambril, A. M. Yacomotti, and A. Boudrioua, *"Optically pumped lasing from organic two-dimensional planar photonic crystal microcavity,"* **Appl. Phys. Lett.** 100, 213304, (2012).

[6] D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias, and H. W. Cahn, *"Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry,"* **Phys. Rev. Lett.** 53, 1951–1953, (1984).

[7] J-B. Suck, M. Schreiber, P. Häussler, *"Quasicrystals: An Introduction to Structure, Physical Properties and Applications,"* **Springer Series in Materials Science** 55, (2002).

[8] R. Penrose, "*Pentaplexity: A class of non-periodic tilings of the plane,"* **Math. Intell.** 2, 32–37, (1979).

[9] X. Zhang, Z. Q. Zhang, and C. Chan, *"Absolute photonic band gaps in 12-fold symmetric photonic quasicrystals,"* **Phys. Rev. B** 63, 081105, (2001).

[10] S. K. Kim, J. H. Lee, S. H. Kim, I. K. Hwang, Y. H. Lee, and S. B. Kim, "*Photonic quasi-crystal single-cell cavity mode,"* **Appl. Phys. Lett.** 86, 031101, (2005).

[11] D. M. Sullivan, "*Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method,"* Second Edition. Canada, MA: **IEEE Press, Wiley**, (2013).

[12] P. B. Deotare, M. W. McCutcheon, I. W. Frank, M. Khan, and M. Lončar, *"High quality factor photonic crystal nanobeam cavities,"* **App. Phys. Lett.** 94, 121106, (2009)

[13] A. Rostami, S. Matloub and A. Haddadpour, *"Q-Factor Microcavity Design Based on 12-Fold Photonic Quasicrystals,"* **Taylor & Francis: Fiber and Integrated Optics** 30, 125-138, (2011).

[14] F. Wen, S. David, X. Checoury, M. E. Kurdi, and P. Boucaud, *"Two-dimensional photonic crystals with large complete photonic band gaps in both TE and TM polarizations"* **Opt. Express** 16, 12278-12289 (2008)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]