



لیگ
پژوهشی
فوتونیک
مکانیک

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 ارائه شده از دو شبکه شبه بلور فوتونی با پارامترهای هندسی متفاوت تشکیل شده است. با چندین مرحله بهینه‌سازی ساختار، بالاترین ضریب کیفیت به مقدار 8.16×10^7 در طول موج ۱۰۴۰ نانومتر به دست می‌آید که طول موج مطلوب برای لیزرهای فمتوثانیه محسوب می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های این ساختار، بهبود همزمان ضریب کیفیت آن همراه با کمترین میزان تغییرات در طول موج ۱۰۴۰ نانومتر است.

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

۲۳۰۰۰۲۳۰ - PACS کد

Design of Quasi periodic microcavity with high quality factor

G. Mosallanezhad¹, A. Ebnali-Heidari², and M. Ebnali-Heidari¹, M.K. Moravvej-Farshi³

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

۱- مقدمه

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 یک بعدی میکروکاواک بلور فوتونی با بیشینه ضریب کیفیت $10^7 \times 1/4$ 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 به عمل آمده در سال ۲۰۱۱، شبکه‌ای ۱۲ گانه از میکروکاواک دو بعدی شبه بلور فوتونی با ضریب کیفیت معادل $10^6 \times 2$ توسط حذف حفره مرکزی و جابجایی حفره‌های مجاور آن در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر با بیشینه ضریب کیفیت $10^7 \times 1/65$ ارائه شد [۱۳].

در این تحقیق یک میکروکاواک دو بعدی شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه با رویکرد کاربردی لیزرهای فوتونی در محدوده طول موجی 10^{40} تا 10^{57} نانومتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این بازه از طول موج تاکنون در بسیاری از لیزرهای فوتونیکی با کاربردهای صنعتی و پژوهشی به کار گرفته شده است. این ساختار از دو شبکه شبه بلور فوتونی با هندسه‌های متفاوت تشکیل شده است. با بهینه‌سازی ۷ مرحله‌ای ساختار و اصلاح پارامترهایی که به تفصیل در مورد آن‌ها اشاره خواهد شد، بالاترین ضریب کیفیت به میزان $10^7 \times 8/16$ به دست آمده است. سرانجام یک ساختار بهینه‌شده با بالاترین ضریب کیفیت به دست آمده است. از مهم‌ترین ویژگی‌های این کاواک، بهبود ضریب کیفیت به همراه کمترین تغییرات آن در طول موج کاری لیزرهای فوتونیکی است. شایان ذکر است که ضریب کیفیت به دست آمده در این طول موج تابه‌حال گزارش نشده است.

۲- ساختار میکروکاواک شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه اصلاح یافته

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

با پیشرفت‌های اخیر در حوزه نانوفوتونیک و مهندسی ساختارهای فوتونیکی، امکان محصورسازی نور در مقایس طول موج در کاواک‌های با ضریب کیفیت بالا و حجم مدل پایین فراهم شده است [۱]. این دستاوردها تاکنون کاربردهای متنوعی مانند کاواک الکترودینامیک کواتسومی [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. از این‌رو، مطالعه کاواک‌های با ضریب کیفیت بالا و حجم مدل پایین در افزارهای فوتونیکی از موضوعات مورد توجه 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 نظری 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 تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۶]. رایج‌ترین شبه بلور فوتونی دو بعدی توسط Penrose با تقارن کروی ۱۰ گانه ارائه شد [۷]. در شبکه‌های شبه بلورهای فوتونی گاف نواری توسط ناحیه pseudo-Jones تعريف می‌شود [۸]. با افزایش تقارن کروی این ناحیه، گاف نواری فوتونی کاملی در شبکه‌های دو و سه بعدی ایجاد می‌شود [۹]. شبکه‌های شبه تناوبی بلورهای فوتونی با کارکردهایی نظری 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

شعاع‌های حفره‌های شبکه داخلی ساختار، (۳) مدت زمان 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 داده شده است. به کارگیری هندسه بیضوی برای حفره‌ها در ساختارهای بلور فوتونی و شبکه 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 گرفته شده است. ضریب کیفیت به مقدار قابل توجهی نسبت به مقادیری که در مرجع [۱۳] به دست آمده است، افزایش می‌یابد. در این پژوهش با توجه به رویکرد کاربردی لیزرهای فوتولیک، مقدار بهینه ضریب کیفیت به $10^7 \times 8/16$ با نیم بیشینه تمام عرض ۲۲۰ فوتولیک در طول موج 1040 نانومتر به دست آمده است.

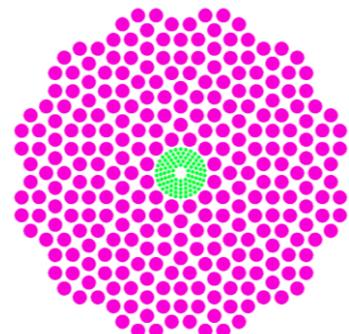
مرحله ۷ با کمترین مقدار تغییرات ضریب کیفیت و مرحله ۵ با در نظر گرفتن زمان انتشار بهینه، بهترین گزینه‌ها برای به کارگیری این میکروکاواک شبکه بلور فوتونی در لیزرهای فوتولیک محسوب می‌شوند. ضریب شکست بهینه‌شده ماده بستر در هر دو مرحله 3.39 و به دست آمده است؛ این ضریب شکست معادل ماده GaAs است.

جدول ۱ - مقادیر بهینه‌شده ضریب کیفیت

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

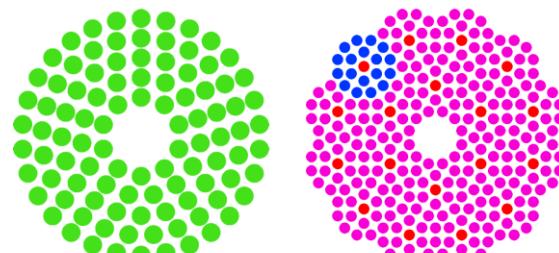
توزیع میدان مرحله ۶ در شکل ۳ نشان داده شده است. در محاسبات ضریب کیفیت کاواک ممکن است چندین مد

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



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

همان‌گونه که در شکل ۲ (الف) پیداست، در این شبکه حفره مرکزی و حلقه اول شبکه شبکه بلور فوتونی ۱۲ گانه حذف گردیده است. شعاع‌های این شبکه $R=0.37a$ و ثابت شبکه آن 390 نانومتر است. شبکه داخلی ساختار شبکه بلور فوتونی در شکل ۲ (ب) مشخص شده است. در این شبکه شعاع‌ها $R=0.47a$ و ثابت شبکه آن 84 نانومتر است. حفره مرکزی و اولین حلقه این ساختار حذف شده است.



شکل ۲ - (الف) ساختار اولیه شبکه خارجی (outer) و (ب) شبکه داخلی (inner) شبکه 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)

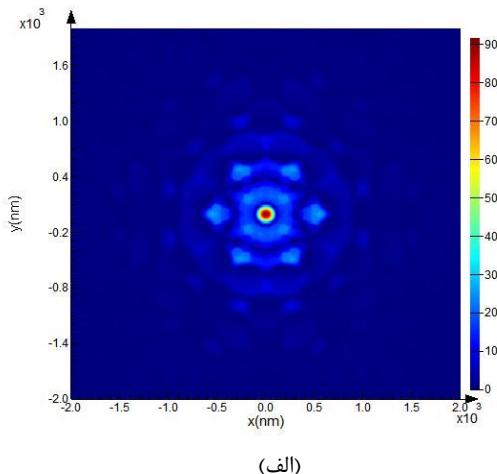
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار میکروکاواک اصلاح شده شبه بلور فوتونی ۱۲ گانه ارائه شده است. ساختار ارائه شده دارای ضریب کیفیت بالا به همراه نرخ تغییرات پایین است که می‌تواند در اپتیک مجتمع، لیزرهای فوتولوئیک و غیره استفاده شود. در این راستا، مشخصات ساختار با رویکرد افزایش ضریب کیفیت میکروکاواک در طول موج 1040 نانومتر توسط الگوریتم PSO بهینه‌سازی و آثار بهینه‌سازی پارامترهای مختلف روی ضریب کیفیت بررسی شده 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. Imamoglu, "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. Abmann, 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)

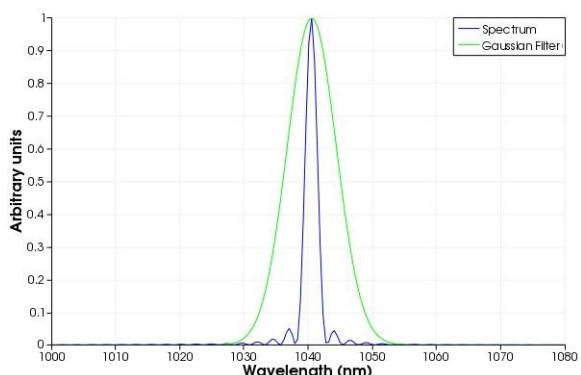
تشدید وجود داشته باشد که ممکن است در دامنه زمانی تداخل داشته باشند. از این‌رو باید هر تشدید در دامنه فرکانسی با استفاده از فیلتر گاوسی جداسازی شود (شکل ۴) تا بتوان با استفاده از تبدیل فوریه معکوس زمان میرایی و درنهایت ضریب کیفیت را برای هر تشدید محاسبه کرد.



(الف)

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

همانگونه که از نمودار ۴ قابل مشاهده است، پیک تشدید در طول موج 1040 نانومتر قرار دارد. مشخصه مهم این ساختار میکروکاواک شبه بلور فوتونی، بالا بودن ضریب کیفیت آن در محدوده طول موج کاری لیزرهای فوتولوئیک 1040 نانومتر است؛ این مقدار ضریب کیفیت تقریباً 41 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.