

دست یابی به ضریب کیفیت بالا در تشدیدگرهای بلور فوتونی تشکیل شده از میله‌های فلزی متخلخل با تخلخل‌های نانومتری در ناحیه‌ی تراهرتز

مهديه کاظمی کورگه، مهدي سوزی و معظمه حسن‌زاده

گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، کرمان، ایران

چکیده - در این مقاله با استفاده از روش عددی عناصر مرزی خواص اپتیکی بلور فوتونی دو بعدی تشکیل شده از میله‌های فلزی متخلخل در ناحیه‌ی طول موجی تراهرتز بررسی شده است. جنس فلز مورد استفاده در این بررسی‌ها مس می‌باشد. مشاهده شده است با استفاده از میله‌های فلزی متخلخل با تخلخل‌های نانومتری به جای استفاده از میله‌های فلزی ساده، می‌توان خواص اپتیکی بلور فوتونی را به طور کامل کنترل کرد و بهبود بخشید. از آن جا که ضریب کیفیت در تشدیدگرهای بلور فوتونی معیار بسیار مهمی در انتخاب تشدیدگر و استفاده از آن در زمینه‌های مختلف کاربردی می‌باشد و پژوهش‌گران به دنبال راهکارهایی برای افزایش آن هستند، در این مقاله با تغییر درصد تخلخل و طراحی مناسب، ضریب کیفیت به میزان ده‌ها برابر افزایش یافته است. همچنین با ایجاد تخلخل (تغییر ضریب پخشندگی) در بلور کامل تشکیل شده از میله‌های فلزی متخلخل، موقعیت و پهنای نوار ممنوعه‌ی فرکانسی جابجا و کنترل گردیده است. علاوه بر این نشان داده شده است می‌توان با تغییر درصد تخلخل، طول موج‌های تشدیدی در تشدیدگر بلور فوتونی را به آسانی جابجا و کنترل کرد. استفاده از روش عناصر مرزی، باعث افزایش سرعت و دقت در انجام محاسبات گردیده است.

کلید واژه: تشدیدگر بلور فوتونی، روش عناصر مرزی، ضریب پخشندگی، ضریب کیفیت، میله‌های فلزی متخلخل

Achieving high quality factor photonic crystal resonators consists of porous metal rods with nano scale porosity in the Terahertz region

Mahdieh Kazemi Korgeh, Mahdi Sovizi and Moazameh Hassanzadeh

Physics Department, Faculty of science, Vali-e- Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Kerman, Iran

Abstract: This research studies optical properties of two-dimension photon crystal formed by porous metal rods in Tera-hertz wavelength region using boundary elements numerical method. Element used in this studies is copper. It is observed that using porous metal rods with nano-scale porosities instead of applying simple metal rods, optical properties of photon crystal can be completely controlled and improved. As quality coefficient in resonators of photon crystal nodes is an important measure to choose accelerator and it is operational to use it in several fields; and researchers are looking for some solutions to increase it. In this paper quality coefficient is increased ten times by changing porosity percentage and a proper designing. Producing porosity in (changing filling coefficient) in completely formed crystal by porous metal rods, position and width of frequency forbidden are replaced and controlled. In addition, it is showed that resonating wavelength in resonator of photon crystal can be easily replaced and controlled by changing porosity percentage. Using boundary elements method causes to increase speed and accuracy of calculations.

Keywords: Photonic crystal resonators, Boundary elements method, Filling factor, Quality factor, Porous metallic rods

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

۱- مقدمه

را در نظر می‌گیریم. سطح مقطع میله‌ها دایره‌ای، شعاع میله‌ها R و طول آنها بی‌نهایت (موازی محور Z) فرض شده است که در مکان $r_i = (x_i, y_i)$ قرار گرفته‌اند. موج الکترومغناطیسی تکفام در مد TE به بلور تابیده می‌شود. میدان را در نواحی مختلف به صورت میدان فرودی $(\vec{\phi}_{inc})$ ، میدان پراکنده شده $(\vec{\phi}_s)$ و میدان داخل میله‌ها $(\vec{\phi}_i)$ فرض کرده‌ایم. موج فرودی تخت فرض شده است. میدان کل در خارج از میله‌ها مجموع میدان فرودی و میدان پراکنده شده می‌باشد که مانند میدان در داخل میله‌ها در معادله‌ی هلمهولتز صدق می‌کند.

$$\nabla^2 \vec{\phi}_{i,s} + k_{i,0}^2 \vec{\phi}_{i,s} = 0 \quad (1)$$

که $k_0 = \sqrt{\epsilon_0} \omega / c$ و $k_i = \omega \sqrt{\epsilon_i(\omega)} / c$ به ترتیب اندازه بردار موج در محیط زمینه و در داخل میله‌های فلزی متخلخل است. $\vec{\phi}$ در مد TE برابر \vec{E} فرض شده است تابع دی‌الکتریک میله‌های فلزی متخلخل از رابطه ماکسول - گارنت به دست می‌آید [۲]:

$$\epsilon_i(\omega) = \epsilon_0 \frac{\epsilon_m(\omega)(1+2f) + 2\epsilon_0(1-f)}{\epsilon_m(\omega)(1-f) + \epsilon_0(2+f)} \quad (2)$$

f ضریب پرشدگی، ϵ_0 تابع دی‌الکتریک حفره‌های هوا که برابر با یک است و $\epsilon_m(\omega)$ تابع دی‌الکتریک فلز می‌باشد که با مدل درود - لورنتس بیان می‌شود [۳]. با استفاده از شکل دوم قضیه گرین و توابع گرین مناسب، معادلات هلمهولتز حاکم بر امواج ϕ_i و ϕ_s به معادلات انتگرال مرزی زیر تبدیل می‌شوند:

$$C(\vec{X}')\phi_s(\vec{X}') = \int_{\Gamma_{out}} G_{out}(\vec{X}, \vec{X}') \frac{\partial \phi_s}{\partial n_{out}} - \phi_s \frac{\partial G_{out}(\vec{X}, \vec{X}')}{\partial n_{out}} d\Gamma \quad (3)$$

$$C(\vec{X}')\phi_i(\vec{X}') = \int_{\Gamma_i} G_i(\vec{X}, \vec{X}') \frac{\partial \phi_i}{\partial n_i} - \phi_i \frac{\partial G_i(\vec{X}, \vec{X}')}{\partial n_i} d\Gamma \quad (4)$$

این معادلات با استفاده از شرایط مرزی (پیوستگی میدان‌های \vec{E} و \vec{H} روی مرز) به معادلات انتگرالی

بلورهای فوتونی فلزی ساختارهای دوره‌ای از فلز-دی‌الکتریک می‌باشند که به منظور تحت تاثیر قراردادن انتشار امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شوند. از جمله کاربردهای بلور فوتونی فلزی می‌توان به ساخت سلول‌های خورشیدی با بازده خروجی بالاتر، استفاده از آنها برای ساخت نشردهنده‌های نوری، استفاده از آنها به عنوان زیرلایه در آنتن‌ها و همچنین طراحی حسگرهای نوری اشاره کرد. تشدیدگرهای فوتونی که نور را به شدت محدود می‌کنند در زمینه‌های مختلف فیزیکی و مهندسی استفاده می‌شوند که از جمله‌ی آنها می‌توان برهمکنش الکترون-فوتون، صافی‌های فوق‌العاده کوچک، لیزرها با آستانه‌ی کم، مدارات مجتمع نوری و اپتیک غیرخطی نام برد [۱]. شاخص مهم و بحرانی برای این کاربردها، ضریب کیفیت است. در کارهای قبلی انجام شده توسط پژوهشگران، میله‌های تشکیل دهنده‌ی بلور فوتونی به صورت کاملاً فلزی در نظر گرفته شده است. در این مقاله در ناحیه‌ی طول موجی تراهرتز میله‌های تشکیل دهنده‌ی بلور فوتونی را به صورت فلز متخلخل دو بعدی فرض کرده‌ایم و جنس فلز مورد استفاده مس می‌باشد. با فرض انجام شده خواص اپتیکی بلور فوتونی به میزان بسیار زیادی کنترل شده است. روش محاسباتی مورد استفاده در این مقاله روش عددی عناصر مرزی است که از جمله برتری‌های آن می‌توان به دقت زیاد، کاهش زمان محاسبات و محاسبه‌ی مقدار تابع در هر نقطه دلخواه را نام برد. در این کار بعد از بررسی صحت انجام محاسبات بلور فوتونی تشکیل شده از میله‌های مسی متخلخل بررسی و با تغییر بسیار کم درصد تخلخل موقعیت و پهنای نوار ممنوعه‌ی فرکانسی کنترل شده است. سپس با ایجاد نقص در بلور، با تغییر پارامترهایی مانند درصد تخلخل (تغییر ضریب پرشدگی)، موقعیت طول موج‌های تشدیدکننده کنترل و ضریب کیفیت به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین راهکارهایی از جمله تغییر طراحی بلور (تغییر شعاع میله‌های فلزی متخلخل)، برای افزایش زیاد ضریب کیفیت مدهای نقص ارائه شده است.

۲- معادلات ریاضی

آرایه‌ای از میله‌های فلزی متخلخل از جنس مس با ضریب شکست مختلط n_i در محیطی با ضریب شکست n_{out}

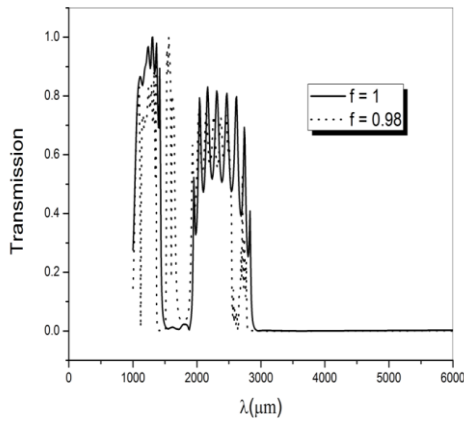
جفت شده تبدیل و سپس با استفاده از روش عددی عناصر مرزی حل می گردند که به دلیل طولانی بودن روابط از بیان آن صرف نظر شده است.

۳- بررسی و تحلیل نتایج

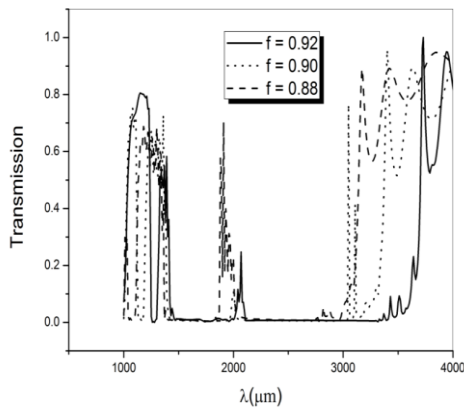
در ابتدا برای بررسی صحت انجام محاسبات آرایه‌ای مربعی از میله‌های دی‌الکتریک از جنس گالیم آرسناید با تعداد 9×9 میله، ضریب شکست ثابت $3/4$ و نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/18$ در نظر گرفته شده است. موقعیت نوار ممنوعه‌ی فرکانسی محاسبه شده، با مقادیر بیان شده در مرجع [۴] در توافق کامل است. در ادامه برای آرایه‌ای از میله‌های فلزی مسی با نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/1$ موقعیت نوار ممنوعه فرکانسی برای $\lambda/a \geq 4.5$ محاسبه شده است که با گزارش‌های قبلی همخوانی دارد [۵]. در آخرین بررسی آرایه‌ای 2×9 از میله‌های فلزی از جنس مس با ثابت شبکه $a = 0.75 \text{ mm}$ و شعاع میله‌های $r = 0.2a$ در نظر گرفته شده است و عبور غیرعادی نور در طول موج 1293 میکرومتر مشاهده شد که با آنچه یو و همکارانش انجام دادند مطابقت دارد [۶]. در این مقاله تمام بررسی‌ها در ناحیه‌ی تراهرتز (طول موج بین 1000 تا 8000 میکرومتر) انجام شده است.

اکنون به عنوان اولین مسئله به منظور بررسی اثر ضریب پرتشددگی بر روی موقعیت نوار ممنوعه‌ی فرکانسی، آرایه‌ای 9×9 از میله‌های متخلخل فلزی از جنس مس با نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/18$ در نظر می‌گیریم. بازه‌ی ممنوعه‌ی فرکانسی ساختار کاملاً فلزی ($f = 1$) از مقدار $2860/65$ میکرومتر شروع شده است و این در حالی است که این بازه برای میله‌های فلزی متخلخل با ضریب پرتشددگی $0/98$ از طول موج $2787/25$ میکرومتر شروع می‌شود. این بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

در مسئله‌ی دوم، تاثیر ضریب پرتشددگی بر پهنا‌ی بازه‌ی ممنوعه‌ی فرکانسی بررسی شده است. این بازه در ضریب پرتشددگی $0/88$ ، از 1382 شروع و تا 2993 میکرومتر ادامه دارد. در ضریب پرتشددگی $0/90$ از 1411 شروع و تا 3163 میکرومتر ادامه دارد و همچنین در ضریب پرتشددگی $0/92$ از 1450 شروع و تا 3422 میکرومتر ادامه دارد. این بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱: تغییر موقعیت نوار ممنوعه‌ی فرکانسی در ساختار بلور فوتونی 9×9 مسی متخلخل با نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/18$

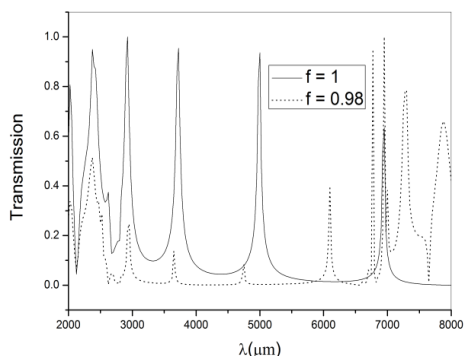


شکل ۲: تغییر پهنا‌ی بازه‌ی ممنوعه‌ی فرکانسی برای ساختار 9×9 مسی متخلخل با نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/18$ در ناحیه‌ی تراهرتز

در مسئله‌ی سوم به منظور بررسی اثر ضریب پرتشددگی بر ضریب کیفیت مدهای نقص، ساختاری از جنس مس و متخلخل 7×7 بعد از حذف 3×5 میله با نسبت شعاع به ثابت شبکه $0/18$ آورده شده است. برای محاسبه‌ی ضریب کیفیت از رابطه $Q = \lambda / \delta\lambda_{FWHM}$ استفاده گردیده است. در این رابطه λ طول موج تشدید و $\delta\lambda_{FWHM}$ تمام پهنا در نصف ارتفاع بیشینه است. در جدول‌های (۱) و (۲) طول موج تشدید، تمام پهنا در نصف ارتفاع بیشینه، و ضریب کیفیت برای مدهای اول، دوم و سوم در ساختار کاملاً فلزی و ساختار متخلخل ($f = 0.99$) بررسی شده است. در ساختار متخلخل ضریب کیفیت به میزان قابل توجهی (بیش از 30 برابر) افزایش یافته است.

جدول ۱: مدهای نقص و ضریب کیفیت آن‌ها در ساختار 7×7 بعد از

حذف ۱۵ میله با شعاع میله های مسی ۰/۰۸ در ساختار کاملاً فلزی



شکل ۵: جایجایی قله‌های تشدیدی در ساختار ۷×۷ بعد از حذف ۱۵ میله و نسبت شعاع به ثابت شبکه ۰/۰۸ با تغییر درصد تخلخل در ناحیه‌ی طول موجی تراهرتز بین ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰ میکرومتر

۴- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شده است که با کاهش تخلخل در بلور فوتونی تشکیل شده از میله های مسی، بازه‌ی ممنوعه‌ی فرکانسی به سمت طول موج‌های کوتاهتر جابجا و پهنای بازه کاهش یافته است. با توجه به اهمیت ضریب کیفیت در انتخاب تشدیدگر مشاهده شد با ایجاد تخلخل و تغییر شعاع میله‌های متخلخل در ساختارهای ناقص بلور فوتونی می‌توان ضریب کیفیت را به میزان قابل توجهی (ده‌ها برابر) افزایش داد. با کاهش تخلخل مدهای تشدیدی به سمت طول موج‌های کوتاهتر جابجا شده‌اند.

مراجع

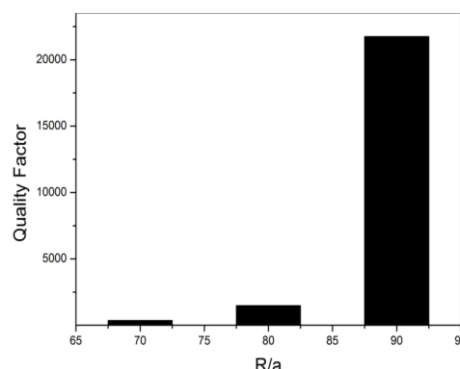
- [1] Yoshihiro Akahane, Takashi Asano, Bong-Shik Son & Susumu Noda, High-Q photonic nanocavity in two-dimensional photonic crystal, nature, Vol.425, pp.944-947, 2003.
- [2] S. Hussain, R. K. Roy, A. K. Pal, Incorporation of silver nanoparticles in DLC matrix and surface plasmon resonance effect, Materials Chemistry and Physics, Vol. 99, pp. 375-381, 2006
- [3] M. Salari, H. R. Askari, Theoretical investigation of absorption and sensivity of nano - plasmonic fiber optic sensors, Optics & Laser Technology, Vol. 48, pp. 315-325, 2013.
- [4] M. Hassanzadeh, M. Sovizi, M. Mohsseni, Position calculation of the frequency band gap in the finite photonic crystal with multiple alternations using boundary element method, Optik, Vol. 124, pp. 6869-6873, 2013
- [5] S. M. Aminifard, M. Sovizi, Simulation of transmitted spectrum in metallic photonic crystals by boundary element method, Optics Communications, Vol. 322, pp. 1-7, 2014.
- [6] J. Yu, L. M. Li, C. Meng, Extraordinary resonance transmission of two-dimensional terahertz metallic photonic crystals without defect, Physica B, Vol. 407, pp. 4738-4740, 2012.

مرتب‌ه مد	$\lambda(\mu m)$	$\delta\lambda_{FWHM}(\mu m)$	ضریب کیفیت
سوم	۳۷۱۵/۸	۸۵/۴	۴۳/۵
دوم	۴۹۹۰/۳	۶۵/۷	۷۵/۹
اول	۶۹۳۵/۵	۲۹/۳۵	۲۳۶/۳

جدول ۲: مدهای نقص و ضریب کیفیت آن‌ها در ساختار ۷×۷ بعد از حذف ۱۵ میله در ساختار متخلخل (ضریب پرشدگی ۹۹ درصد)

مرتب‌ه مد	$\lambda(\mu m)$	$\delta\lambda_{FWHM}(\mu m)$	ضریب کیفیت
سوم	۳۸۲۳/۸	۸/۲	۴۶۶/۳
دوم	۴۹۲۹/۴	۸/۱۵	۶۰۴/۸
اول	۶۵۷۹/۸	۱	۶۵۷۹/۸

در بررسی دیگر به منظور افزایش ضریب کیفیت با ثابت نگه‌داشتن سیستم، شعاع میله‌های فلزی تغییر داده شده است در نسبت شعاع میله‌ها به ثابت شبکه‌ی ۰/۰۷، ۰/۰۸، ۰/۰۹ و در ضریب پرشدگی ۰/۹۸ درصد و در مد دوم، ضریب کیفیت به ترتیب ۳۶۸/۳، ۱۴۸۱/۲ و ۲۱۷۴۷/۷ به دست آمد. شکل (۴) مقایسه‌ی ضریب کیفیت را نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمودار ضریب کیفیت مد دوم بر اساس نسبت شعاع به ثابت شبکه برای ساختار ۷×۷ با حذف ۱۵ میله در ضریب پرشدگی ۰/۹۸

به عنوان آخرین مسئله، تاثیر تخلخل بر روی جایجایی قله‌های تشدیدی در ساختار ۷×۷ بعد از حذف ۱۵ میله بررسی شده است. طول موج‌های تشدیدی برای ساختار کاملاً مسی در جدول (۱) آورده شده است. این طول موج‌ها برای مس متخلخل (ضریب پرشدگی ۰/۹۸) برای مدهای اول، دوم و سوم به ترتیب برابر با ۶۰۹۰/۵، ۴۷۴۲ و ۳۶۵۶/۸ میکرومتر به دست آمده است. جایجایی قله‌های تشدیدی در شکل (۵) نشان داده شده است.