

«مقاله پژوهشی»

بررسی مدهای نقص در بلور فوتونی سه لایه‌ای تک‌بُعدی متقارن

مرضیه دادخواه^۱، تورج غفاری^{*۲}

۱. کارشناسی ارشد، فیزیک، دانشگاه پیام نور

۲. دانشیار، گروه فیزیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸

Investigation of Defect Modes in Symmetric 1-D Ternary Photonic Crystal

M. Dadkhah¹, T. Ghaffary^{*2}

1. M.A., Physics, Payame Noor University

2. Associate Professor, Department of Physics, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 2021/02/03

Accepted: 2021/04/28

Abstract

In this paper, we investigate a 1-D ternary photonic crystal (1-DTPC) with symmetric geometry. The defect modes for both TE and TM polarization are investigated by variation of wavelength. In this case, there are two resonant peaks within the prohibited photonic band gap (PBG) which corresponds to the so-called defect mode. In the TE polarization, by increasing the incident angles the defect modes are shifted toward the shorter wave length and in the TM polarization shifted toward the larger wave length. The height of defect modes is not related to the incident angles. By increasing the number of unit cells, the width of the defect modes are decreased and this increasing doesn't influence the position of defect mode. Furthermore, by increasing the refractive index of defect layer, the defect modes are shifted toward the center of band gap for TE and TM polarizations. The defect mode with shorter wave length is shifted faster than the defect mode with larger wave length. By increasing the thickness of defect layer, the defect modes are shifted toward the larger wave length.

Keywords

Photonic Crystal, Defect Modes, Photonic Band Gap

چکیده

این مقاله به بررسی بلور فوتونی سه لایه‌ای تک‌بُعدی (1-DTPC) با هندسه متقارن پرداخته است. حالت‌های نقص برای قطبش میدان الکتریکی عرضی و میدان مغناطیسی عرضی با تغییر طول موج بررسی می‌شوند. در این حالت، دو قله تشدید در نوار گاف فوتونی (PBG) وجود دارد که مربوط به حالت نقص است. در قطبش میدان الکتریکی عرضی، با افزایش زوایای فرودی، حالت‌های نقص به سمت طول موج کوتاه‌تر و در قطبش میدان مغناطیسی عرضی به سمت طول موج بزرگ‌تر منتقل می‌شوند. ارتفاع مدهای نقص به زوایای فرودی ارتباطی ندارد. با افزایش تعداد سلول‌های واحد، پهنای حالت‌های نقص کاهش می‌یابد و این افزایش در موقعیت مکانی حالت نقص تأثیری ندارد. علاوه بر این، با افزایش ضریب شکست لایه نقص، حالت‌های نقص به سمت مرکز نوار گاف برای قطبش‌های میدان الکتریکی عرضی و میدان مغناطیسی عرضی منتقل می‌شوند. مد نقص با طول موج کوتاه‌تر سریع‌تر از مد نقص با طول موج بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت لایه نقص، مدهای نقص به سمت طول موج بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شوند.

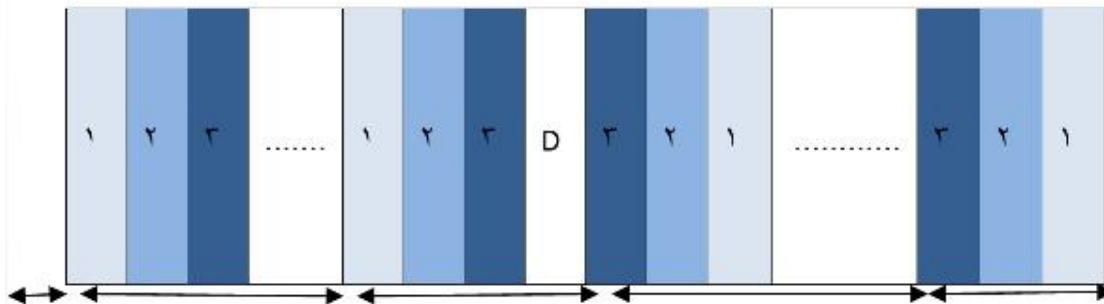
واژه‌های کلیدی

بلور فوتونی، مدهای نقص، نوار گاف فوتونی

مقدمه

بلورهای فوتونی (PC^1) به هر ساختاری که ضریب شکست آن به طور متناوب تغییر کند، گفته می‌شود. اگر این تکرار در یک بعد باشد، به بلور تشکیل شده، بلورهای فوتونی یک بعدی گفته می‌شود. تکرار ساختار متناوب در دو و سه بعد نیز بلورهای فوتونی دو و سه بعدی را به وجود می‌آورد [۶-۱]. مهم‌ترین خاصیتی که اهمیت کاربردی بلورهای فوتونی را تعیین می‌کند، وجود نوار گاف فوتونی (PBG^2) است. نوار گاف فوتونی به انرژی یا محدوده فرکانسی اشاره دارد که در آن انتشار نور در داخل بلور فوتونی ممنوع است [۹-۷]

تک‌بعدی ($1-DTPC^3$) متقارن برای هر دو قطبش میدان الکتریکی عرضی و میدان مغناطیسی عرضی است. از جمله مزیت‌های مطالعه $1-DTPC$ که می‌توان به آن اشاره کرد، تعداد بیشتر حالت‌های طیف‌های عبور نوار گاف فوتونی پهن تر در مقایسه با بلور فوتونی دو لایه است. در این تحقیق ما به طور خاص حالت‌های نقص را به عنوان تابعی از زاویه تابش مطالعه می‌کنیم و دو حالت نقص را در شکاف باند فوتونی می‌یابیم. در واقع، اثرات تغییر تعداد سلول واحد، ضریب شکست لایه نقص و ضخامت نقص بر روی مدهای نقص مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.



شکل ۱. بلور فوتونی متقارن با نقص

در این مقاله، یک $1-DTP$ را که یک لایه نقص (DL^4) به آن اضافه شده است و با $A/(123)^N D(321)^N/S$ مشخص می‌شود را در نظر می‌گیریم که در آن N تعداد دوره‌های تناوب برای بلور فوتونی است، A و S به ترتیب هوا و زیرلایه را نشان می‌دهند. علاوه بر این، ۱، ۲ و ۳ شاخص لایه‌هایی هستند که ضخامت آنها معمولاً به صورت یک چهارم طول موج در نظر گرفته می‌شود. $n_1 d_1 = n_2 d_2 = n_3 d_3 = \frac{\lambda_0}{4}$ و $n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}$ که n_1 ، n_2 و n_3 به ترتیب ضرایب شکست و ضخامت لایه‌های ۱، ۲، ۳ و D می‌باشند. q یک ثابت اختیاری و λ_0 طول موج در نظر گرفته شده هستند. شکل ۱ یک بلور فوتونی متقارن با نقص را نشان می‌دهد.

هنگامی که تابش با فرکانس فوق به داخل نوار گاف فوتونی در ساختار برخورد می‌کند [۱۲-۱۰]. برای ایجاد یک لایه نقص تنها کافی است ضخامت‌های مختلف یا ضریب شکست متفاوت ایجاد گردد که منجر به شکستن تناوب بلور فوتونی شود که شبیه نقص در ساختار بلوری یک نیمه هادی است [۱۷-۱۳]. این لایه نقص، در اصل، به عنوان یک تشدید کننده حفره رفتار می‌کند، هنگامی که شرایط تشدید برآورده می‌شود. مدهای نقص در درون ناحیه نوار گاف فوتونی ظاهر می‌شوند [۲۲-۱۸].

برای بررسی خواص نوری ساختار دی‌الکتریک تناوبی مانند محاسبه ضریب انتقال، روش‌های مختلفی مانند روش بسط سری فوریه یا ماتریس انتقال وجود دارد. ما در این مقاله از روش ماتریس انتقال برای محاسبات خود استفاده می‌کنیم. هدف این مقاله بررسی مدهای نقص بلور فوتونی سه لایه‌ای

3. One Dimensional Ternary Photonic Crystal
4. Defect Layer

1. Photonic Crystal
2. Photonic Band Gap

بحث نظری

برای سلول واحد سمت راست می‌باشند. از آنجایی که محیط بدون اتلاف است و M_0^+ دوطرفه و M_0^- به صورت زیر ساده می‌شوند [۱۲]:

$$M_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{t^*} & \frac{r}{t} \\ \frac{r^*}{t^*} & \frac{1}{t} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که t و r به ترتیب ضرایب عبور و بازتاب یک سلول واحد هستند. در بررسی چند لایه‌های مشابه، ماتریس باید شکل M_0^N داشته باشد

$$M_0^N = \begin{bmatrix} \frac{1}{t_N^*} & \frac{r}{t_N} \\ \frac{r_N^*}{t_N^*} & \frac{1}{t_N} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

از آنجایی که ماتریس M_0^N ماتریس انتقال موج N لایه‌ای بدون نقص است، ماتریس کل انتقال سیستم به شکل زیر است:

$$M = M_e M_0^{N-1} M_i, \quad (۸)$$

در اینجا M_i ماتریس انتقال موج مرز ورودی است و M_e ماتریس انتقال موج از N امین بخش به محیط دیگر است [۱۲].

از آنجایی که ساختار تناوبی سیستم با یک لایه نقص همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است شکسته می‌شود، ماتریس کل انتقال سیستم به شکل زیر است:

$$M = M_e M_0^{-(N-1)} M_D M_0^{+(N-1)} M_i \quad (۹)$$

که در آن M_D ماتریس انتقال لایه نقص است. دامنه ماتریس عبور سیستم را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$t = \frac{1}{M(2,2)} \quad (۱۰)$$

سپس عبور کل سیستم را می‌توان به شکل زیر نوشت:

هرگاه موج الکترومغناطیسی تختی بر یک ساختار شبکه‌ای فرود آید و با آن واکنش نشان دهد منجر به ایجاد دو موج تخت جلورونده و عقب‌گرد می‌شود. در اینجا $\Lambda = d_1 + d_2 + d_3$ دوره تناوب ساختار است. میدان‌های الکتریکی در لایه‌های ۱، ۲ و ۳ عبارتند از:

$$\begin{aligned} E_{1y}(z) &= A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z} \\ E_{2y}(z) &= C_1 e^{ik_2(z-d_1)} + D_1 e^{-ik_2(z-d_2)} \\ E_{3y}(z) &= E_1 e^{ik_3(z-(d_1+d_2))} \\ &+ F_1 e^{-ik_3(z-(d_1+d_2))} \end{aligned} \quad (۱)$$

که در آن $k_i = \frac{\omega \tilde{n}_i}{c}$ ، $i = 1, 2, 3$ عدد موج و $\tilde{n}_i = n_i \cos \theta_i$ برای قطبش TE و $\tilde{n}_i = n_i \sec \theta_i$ برای قطبش میدان مغناطیسی عرضی در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. در این رابطه θ_i زاویه پرتو ورودی در لایه اول است و θ_D و θ_A به ترتیب زاویه پرتو ورودی در هوا و لایه نقص هستند که در معادلات زیر صدق می‌کنند:

$$\begin{aligned} n_1 \sin \theta_1 &= n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3 \\ &= n_D \sin \theta_D \\ &= n_A \sin \theta_A \end{aligned} \quad (۲)$$

با اعمال شرایط مرزی می‌توانیم ماتریس انتقال هر سلول واحد سه لایه را به صورت زیر به دست آوریم [۱۱]:

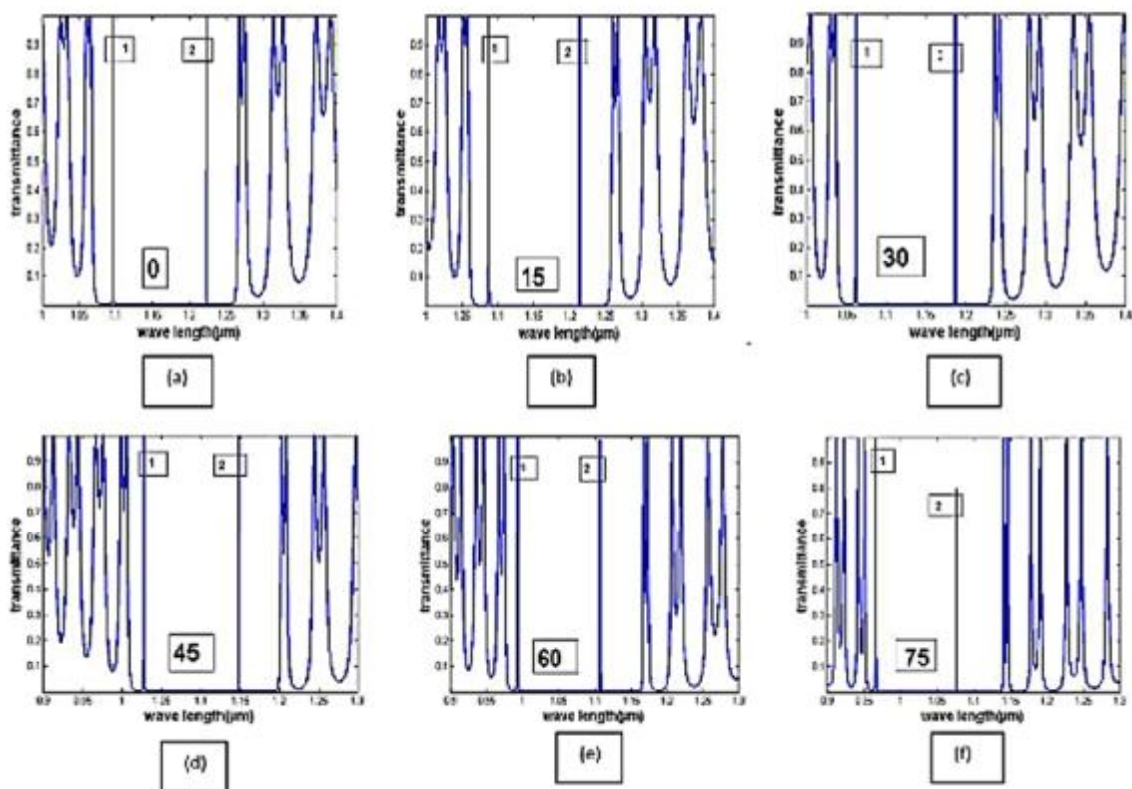
$$M_j = \begin{bmatrix} (1 + \delta_j) e^{i\varphi_j} & (1 - \delta_j) e^{-i\varphi_j} \\ (1 - \delta_j) e^{i\varphi_j} & (1 + \delta_j) e^{-i\varphi_j} \end{bmatrix}, j = 1, 2, 3 \quad (۳)$$

که در رابطه (۳) $\delta_1 = \frac{k_1}{k_2}$ ، $\delta_2 = \frac{k_2}{k_3}$ ، $\delta_3 = \frac{k_3}{k_1}$ می‌باشند و $\varphi_j = k_j d_j$ فاز هر لایه در نظر گرفته می‌شود. ماتریس سلول واحد یک شبکه تناوبی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$M_0^+ = M_{31} M_{23} M_{12} \quad (۴)$$

برای سلول واحد سمت چپ و

$$M_0^- = M_{13} M_{21} M_{32} \quad (۵)$$



شکل ۲. طیف عبوری قطبش TE برای ساختار متقارن ۱-DTPC به عنوان تابعی از طول موج در زوایای مختلف فرود (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°, (e) 60°, (f) 75°

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = 2, n_1 = n_D = 1.9$$

$$n_D d_D = q \frac{\lambda_0}{4}, n_3 d_3 = \frac{\lambda_0}{4} \text{ و } q = 8 \text{ می‌باشند.}$$

طول موج طراحی $\lambda_0 = 1.550 \mu m$ در ناحیه مادون قرمز و تعداد تناوبها برای هر 1-DTPC، $N = 10$ است. زیر لایه S برای سادگی هوا در نظر گرفته می‌شود. برای رسم نمودارها، چون تغییرات منحنی زیاد است، اعداد را برابر با ۱۰۰۰۰ می‌گیریم. در این حالت دو مد نقص وجود دارد که با دو پیک تشدید ۱ و ۲ در نوار گاف فوتونی نشان داده می‌شوند. ویژگی تقارن منجر به دو راه حل ممکن در لایه نقص در تشدید می‌شود. یک راه حل که متناسب با تابع سینوسی و متعلق به تقارن فرد است، مربوط به حالت با طول موج کوتاه‌تر است و با ۱ نشان داده می‌شود. دیگری که متناسب با تابع کسینوس است، دارای تقارن زوج است و با ۲ مشخص می‌شود. با افزایش زاویه برخورد، حالت نقص به طول موج کوتاه‌تر منتقل می‌شود. ارتفاع مدهای نقص به

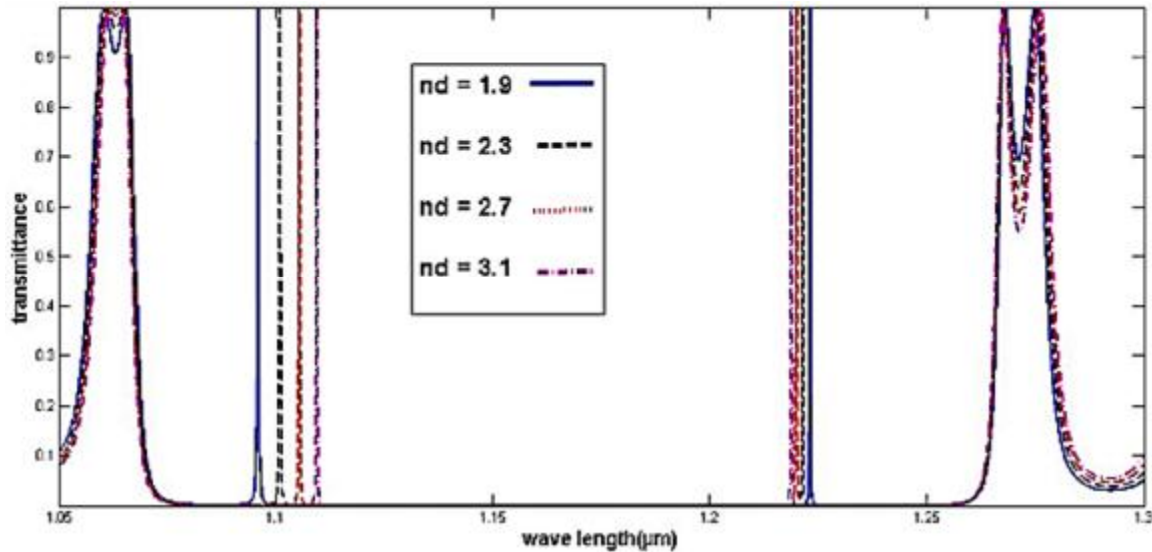
$$T = |t|^2 \quad (11)$$

در بخش بعدی از معادله ۱۰ و ۱۱ برای محاسبه انتقال سیستم استفاده می‌کنیم.

تغییر مدهای نقص برای زوایای ورودی مختلف در بلور فوتونی سه لایه‌ای تک‌بعدی (1-DTPC)

قطبش میدان الکتریکی عرضی

در شکل (۲) طیف عبوری وابسته به طول موج برای بلور فوتونی سه لایه‌ای تک‌بعدی متقارن برای قطبش میدان الکتریکی عرضی در زوایای برخورد مختلف ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه به ترتیب نشان داده شده است. پارامترهای مواد مورد استفاده در محاسبه $n_2 = 3.3$ ، $n_3 =$

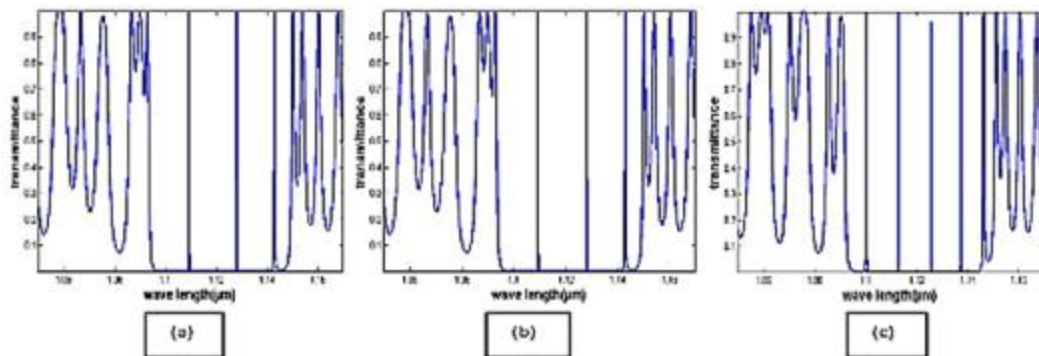


شکل ۳. تغییرات پهنای مدهای نقص با افزایش تعداد لایه‌ها برای فرود عمودی
(a) $N = 6$, (b) $N = 8$, (c) $N = 10$, (d) $N = 12$

تغییر تعداد لایه‌ها

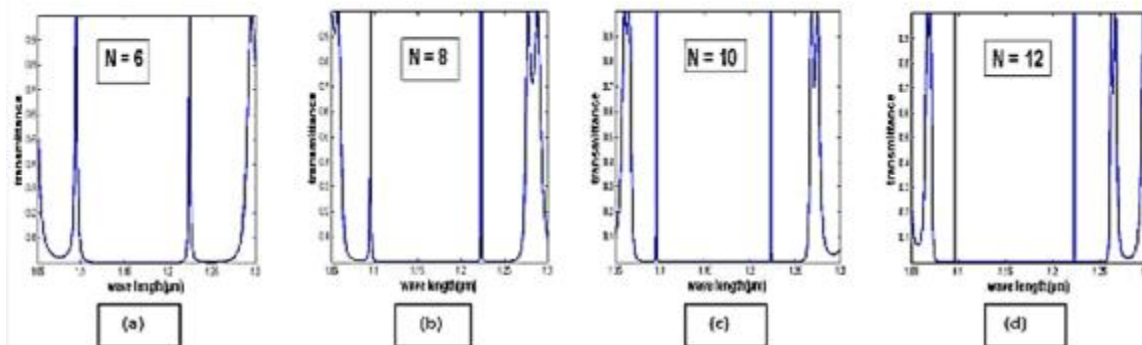
در این بخش، تأثیر تغییر تعداد سلول‌های واحد دو طرف لایه نقص را بر پهنای مدهای نقص برای هر دو قطبش بررسی می‌کنیم. این تغییرات در شکل ۳ به ترتیب برای $N = 6, 8, 10, 12$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول‌های واحد، پهنای مدهای نقص کاهش می‌یابند. اثرات افزایش N عبارت است از باریک شدن شکل قله و تیزتر شدن لبه‌های نوار. یکی از کاربردهای این اثرات در کاواک‌های تشدیدی است که با

زوایای برخورد ارتباطی ندارد. در تشدید، چند لایه مانند یک لایه عمل می‌کند و می‌توانیم آن را به عنوان یک تشدیدکننده فابری پروا در نظر بگیریم و پیک عبوری زمانی رخ می‌دهد که فاصله نوری برابر با $n_D d_D \cos \theta_D$ مکان قله متناسب با $\cos \theta_D = \sqrt{1 - \frac{n_A^2}{n_D^2} \sin^2 \theta_A}$ با افزایش زوایای فرودی، $\cos \theta_D$ کاهش می‌یابد و حالت‌های نقص به سمت طول موج کوتاه‌تر منتقل می‌شوند.



شکل ۴. تغییرات ضریب شکست لایه نقص برای فرود عمودی

افزایش طول کاواک و یا افزایش تعداد تناوب در بازتابنده‌ها می‌توان پهنای حالت تشدید را کاهش داد.



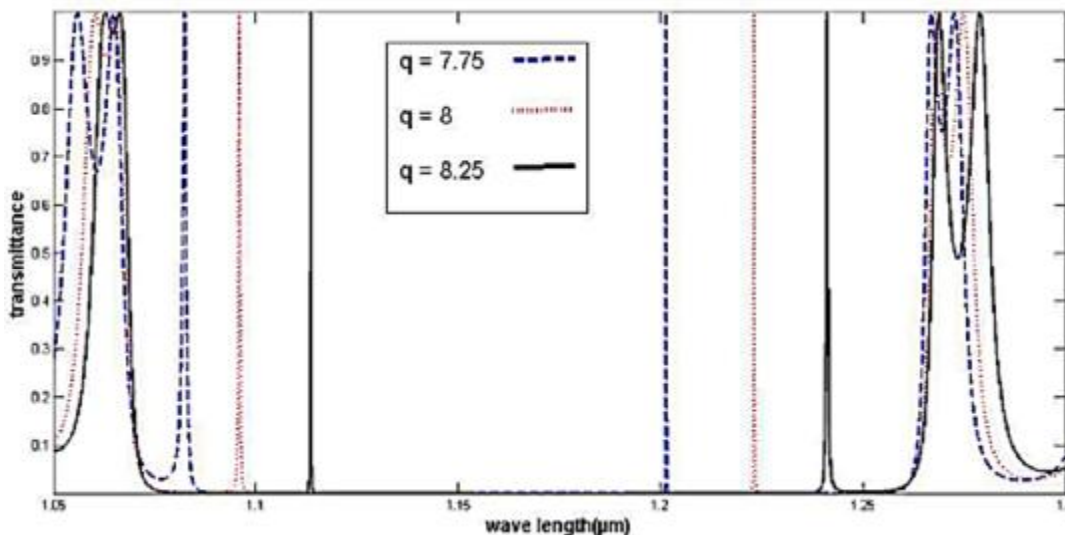
شکل ۵. تغییرات ضخامت لایه نقص برای فرود عمودی

تغییر ضخامت لایه نقص

در این بخش، ما تأثیر تغییرات ضخامت لایه نقص را در برخورد عادی، برای $q\lambda_0 = \frac{4}{n_D d_D}$ و به ازای مقادیر $q = 7.75, 8, 8.25$ بررسی می‌کنیم (شکل ۵). مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایه‌های نقص، مدهای نقص به سمت طول موج بزرگ‌تر منتقل می‌شوند. اگر ضخامت لایه‌ها را $d_1 = 0.736 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.775 \mu\text{m}$

تغییر ضریب شکست لایه نقص

در این بخش تأثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص را بررسی می‌نماییم. تغییرات ضریب شکست لایه نقص با مقدار $n_1 = 1.9$, $n_2 = 2$, $n_3 = 3.3$ در شکل ۴ برای چهار زاویه فرودی $n_d = 1.9, 2.3, 2.7, 3.1$ مشاهده می‌شود.

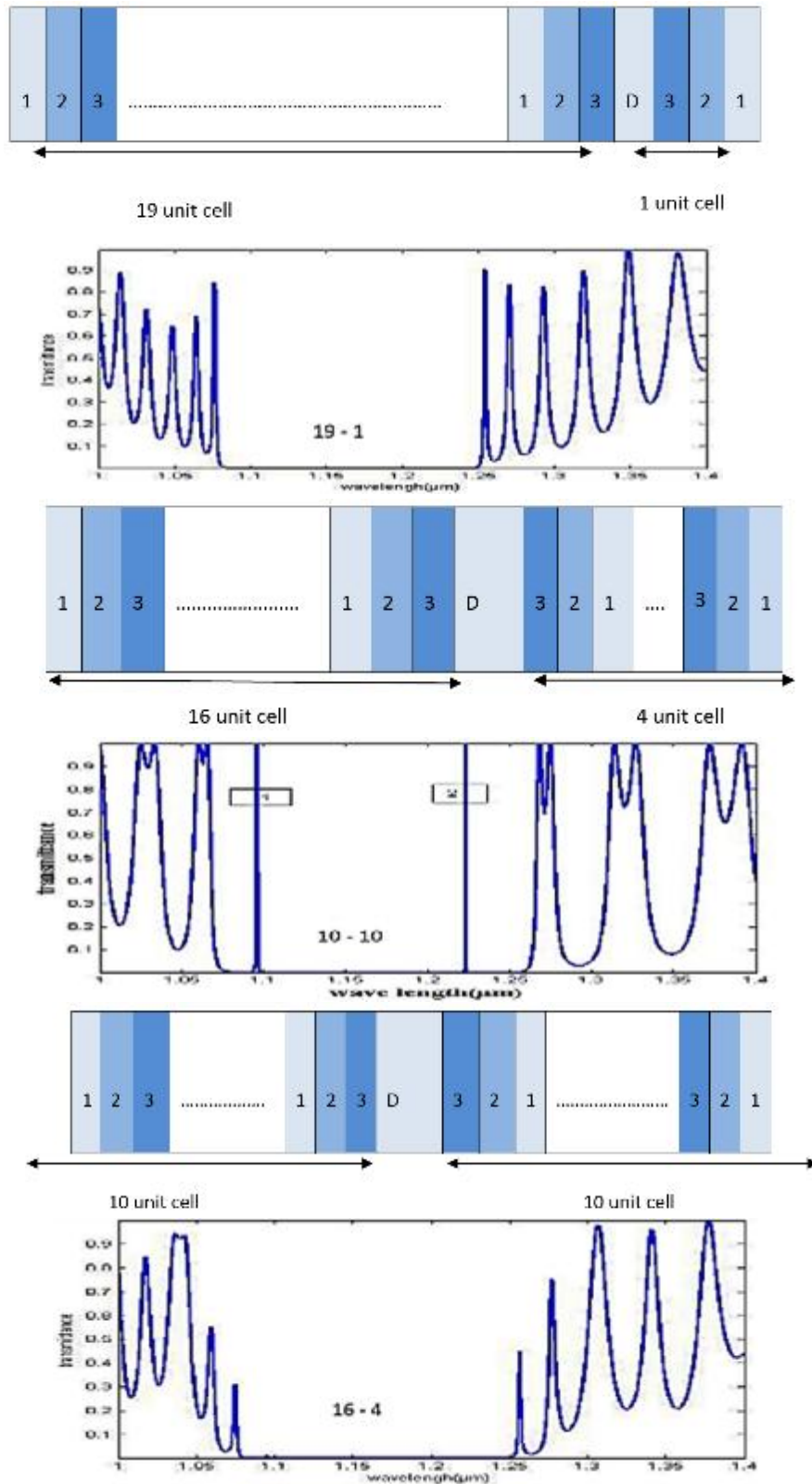


شکل ۶. تغییرات ضخامت لایه نقص برای فرود عمودی

$d_1 = 0.736 \mu\text{m}$, $d_2 = 0.775 \mu\text{m}$, $d_3 = 1.278 \mu\text{m}$, $d_D = q \times 1.743 \mu\text{m}$, (a) $q=3$, (b) $q=5$, (c) $q=7$

که $d_D = q \times 1.743 \mu\text{m}$ ، $d_3 = 1.278 \mu\text{m}$ در آن $q = 3, 5, 7$ باشد در نظر بگیریم، آنگاه تعداد مدهای نقص در نوار گاف فوتونی افزایش می‌یابد (شکل ۶).

با افزایش ضریب شکست لایه‌های نقص، مدهای نقص به سمت مرکز نوار گاف جابه‌جا می‌شوند. حالت نقص با طول موج کوتاه‌تر سریع‌تر از حالت نقص با طول موج بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شود. هیچ تغییری در پهنای نوار گاف فوتونی وجود ندارد و تغییر مکان مد نقص تنها نتیجه افزایش ضریب شکست است.



شکل ۷. تغییرات موقعیت لایه نقص برای فرود عمودی

تغییر مکان لایه نقص بلور فوتونی

مکان لایه نقص بر مد نقص تأثیر می‌گذارد. ما این موضوع را برای مکان‌یابی لایه نقص در موقعیت‌های مختلف 1-DTPC مطالعه کرده‌ایم. همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، زمانی که لایه نقص بین اولین تا نوزدهمین سلول واحد قرار می‌گیرد، هیچ حالت نقصی در نوار گاف فوتونی وجود ندارد و زمانی که لایه نقص به تدریج به مرکز 1-DTPC نزدیک می‌شود، وجود حالت نقص واضح‌تر می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مد نقص برای ساختارهای متقارن برای هر دو قطبش میدان الکتریکی عرضی و میدان مغناطیسی عرضی به صورت نیمه تحلیلی مطالعه گردید. دو پیک تشدید که مربوط به مدهای نقص است در نوار گاف فوتونی

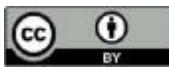
وجود داشت. مشخص شد که در قطبش میدان الکتریکی عرضی با افزایش زاویه برخورد، مدهای نقص به سمت طول موج کوتاه‌تر و در قطبش میدان مغناطیسی عرضی به سمت طول موج بزرگ‌تر جابه‌جا می‌شوند و ارتفاع مدهای نقص به زوایای فرود بستگی ندارد. همچنین با افزایش تعداد سلول‌های واحد، پهنای مد نقص کاهش یافت. افزایش N باعث باریک شدن شکل قله و تیزتر شدن لبه‌های نوار گردید. علاوه بر این، با افزایش ضریب شکست لایه‌های نقص، مدهای نقص برای هر دو قطبش به سمت مرکز نوار گاف و با افزایش ضخامت لایه‌های نقص، مدهای نقص به سمت طول موج‌های بزرگ‌تر منتقل می‌شوند. این ویژگی کاربردهای زیادی در طراحی بلور فوتونی دارد و می‌توان از آن در طراحی فیلترها و قطبش نور استفاده کرد.

References

- [1] Armenise MN, Campanella CE, Ci-minelli C, Dell'Olivo F, Passaro VM. Phononic and photonic band gap structures: modelling and applications. *Physics Procedia*. 2010 Jan 1; 3(1):357-64.
- [2] Naumov AN, Zheltikov AM. Ternary one-dimensional photonic band-gap structures: dispersion relation, extended phase-matching abilities, and attosecond outlook. *Laser physics*. 2001; 11(7):879-84.
- [3] Ozbay E, Bulu I, Aydin K, Caglayan H, Guven K. Physics and applications of photonic crystals. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*. 2004 Oct 1; 2(2): 87-95.
- [4] Ren X, Otsuka K. Universal symmetry property of point defects in crystals. *Physical review letters*. 2000 Jul 31; 85(5):1016.
- [5] Agio M, Soukoulis CM. Ministop bands in single-defect photonic crystal waveguides. *Physical Review E*. 2001 Oct 26; 64(5):055603.
- [6] Monzon J. J, Yonte T, Sanchez-Soto L. L, " Characterizing the Reflectance of Periodic Layered Media," *Optics Communications*, Vol. 218, 2003
- [7] Ouchani N, Bria D, Nougouai A, Djafari-Rouhani B. Photonic band structure and omnidirectional band gap in anisotropic superlattice. *Solar energy materials and solar cells*. 2006 Jun 15; 90(10):1445-57.
- [8] Bananej A, Hamidi SM, Li W, Li C, Tehrani MM. A flexible design for one-dimensional photonic crystals with controllable photonic bandgap width. *Optical Materials*. 2008 Aug 1; 30 (12): 1822-7.
- [9] Johnson SG, Joannopoulos JD. Designing synthetic optical media: photonic crystals. *Acta materialia*. 2003 Nov 25; 51(19):5823-35.
- [10] Panoiu NC, Osgood Jr RM, Zhang S, Brueck SR. Zero-n bandgap in photonic crystal superlattices. *JOSA B*. 2006 Mar 1; 23(3):506-13.
- [11] Srivastava R, Thapa KB, Pati S, Ojha SP. Omni-direction reflection in one dimensional photonic crystal. *Progress in Electromagnetics Research*. 2008; 7: 133-43.
- [12] Gharaati A, Mohamadebrahimi L, Roozitalab Z. Photonic band gap in negative ternary refractive indices of two-dimensional photonic crystal. *Optica*

- Applicata*. 2014; 44(4).
- [13] Gharaati A, Ebrahimzadeh M. Enhanced Microwave Absorption Properties of FeCo@ TiO₂ Core-Shell Nanoparticles. *Current Nanoscience*. 2019 Apr 1; 15(2):163-8.
- [14] Kurt H. *Photonic crystals: Analysis, design and biochemical sensing applications* (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology). 2006.
- [15] Yeh P, Yariv A, Hong CS. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. *General theory*. *JOSA*. 1977 Apr 1; 67(4):423-38.
- [16] Sukhoivanov IA, Guryev IV. *Photonic crystals: physics and practical modeling*. Springer; 2009 Sep 21.
- [17] Wu CJ, Wang ZH. Properties of defect modes in one-dimensional photonic crystals. *Progress in Electromagnetics Research*. 2010; 103: 169-84.
- [18] Ghaforyan H, Ebrahimzadeh M, Ghafary T, Rezazadeh H, Jahromi ZS. Microwave absorbing properties of Ni nanowires grown in nanoporous anodic alumina templates. *Chinese Journal of Physics*. 2014 Feb 1; 52(1):233-8.
- [19] Chen XF, Shen XM, Jiang MP, Shi DF. Properties of defect mode and optical enhancement of 1D photonic crystals with a defect layer of negative refractive index material. *Optoelectronics Letters*. 2005 Nov 1; 1(3):198-200.
- [20] Özbay E, Tuttle G, Sigalas M, Soukoulis CM, Ho KM. Defect structures in a layer-by-layer photonic band-gap crystal. *Physical Review B*. 1995 May 15; 51(20):13961.
- [21] Fedele F, Yang J, Chen Z. Defect modes in one-dimensional photonic lattices. *Optics letters*. 2005 Jun 15; 30(12): 1506-8.
- [22] Matthews AF, Mingaleev SF, Kivshar YS. Bandgap engineering and defect modes in photonic crystals with rotated hexagonal holes. arXiv preprint physics/0311018. 2003 Nov 5.

COPYRIGHTS



© 2022 by the authors. Licensee PNU, Tehran, Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY4.0) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)