

بررسی مدهای عبوری در بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم

عبدالرسول قرائتی¹، زینب زارع^{2*}

1. استاد، فیزیک، دانشگاه پیام نور

2. دکتری فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1397/01/23 تاریخ پذیرش: 1397/04/09

Investigation of Transmission Modes in a Binary Disordered Photonic Crystal

A. Gharaati¹, Z. Zare^{*2}

1. Professor, Department of Physics, Payam Noor University, Iran

2. Ph.D., Department of Physics, Payam Noor University, Iran

Received: 2018/04/12 Accepted: 2018/06/30

Abstract

In this paper, the transmission spectrum of a disordered binary one dimensional photonic crystal with a defect layer is investigated in two states, the disordered of thickness and the disordered of optical path length in both polarizations TE and TM. Then the displacement of defect mode wavelengths is studied. As we observed the defect mode shifts toward the larger wavelength when the degree of disorder get increased in both symmetric and asymmetric cases. Furthermore, in a given degree of disorder the defect mode shifts toward the shorter wavelength as the incident angles get increased. These displacements are more tangible in TE polarization. In the symmetric structure the height of defect modes gets decreased by increasing the degree of disorder.

Keywords

Photonic Crystal, Disordered, Defect Mode.

چکیده

در این مقاله، با استفاده از روش ماتریس انتقال، طیف عبوری بلور فوتونی یک بعدی دولایه‌ای بی‌نظم را با نقص بررسی خواهیم کرد و دو حالت بی‌نظمی مربوط به ضخامت و طول اپتیکی را در نظر گرفته و جابه جایی طول موج مد نقص را در این دو حالت در دو قطبش TE و TM بررسی خواهیم کرد. مشاهده می‌شود که با افزایش مرتبه بی‌نظمی در هر دو حالت متقارن و نامتقارن و در دو مورد بی‌نظمی ضخامت و طول اپتیکی، مدهای نقص به سمت طول موج‌های بیشتر جابه جا می‌شوند. به علاوه، با افزایش زاویه فرودی در یک مرتبه بی‌نظمی ثابت، مد نقص به سمت طول موج‌های کوتاه تر جابه جا می‌شود. میزان جابه جایی در قطبش TE همواره بیشتر از قطبش TM است. همچنین، در حالت متقارن، با افزایش مرتبه بی‌نظمی ارتفاع مدهای نقص افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

بلور فوتونی، بی‌نظمی، مد نقص.

*Corresponding Author: zare@student.pnu.ac.ir

* نویسنده مسئول: زینب زارع

مقدمه

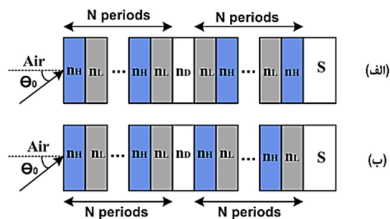
بلورهای فوتونی دو لایه‌ای ساختارهای تناوبی متشکل از دو لایه دی‌الکتریک با ضرایب شکست متفاوت هستند. این ساختارها معمولاً به عنوان آینه دی‌الکتریک (بازتابنده براگ) نقش مهمی در دستگاه‌های فوتونیک مدرن ایفا می‌کنند [1-3]. به دلیل تناوبی بودن بلورهای فوتونی، این ساختارها در نواحی خاصی از فرکانس‌ها اجازه عبور نور را نمی‌دهند؛ این نواحی نوار گاف فوتونی نامیده می‌شوند [4-5]. در ساخت بلورهای فوتونی از مواد مختلفی از جمله دی‌الکتریک‌ها [6]، نیمه رساناها [7]، ابررساناها [8] و فلزات [9-10] استفاده می‌شود. ساده‌ترین نوع بلورهای فوتونی از نظر ساخت و تولید بلورهای فوتونی یک بعدی تمام دی‌الکتریک هستند. بلورهای فوتونی کاربردهای بسیار زیادی در ساخت ابزار نوری دارند. مهم‌ترین این کاربردها عبارتند از، فیلترهای نوری [11]، سوئیچ‌های نوری [12]، فیبرهای نوری [13-15] و موجبرهای نوری [16-17] است. با اضافه کردن یک لایه با ضریب شکست و یا ضخامت متفاوت با سایر لایه‌ها می‌توان تناوب ساختار را از بین برد که این همان لایه نقص است [18]. مدهای نقص می‌توانند در ناحیه نوار گاف جایگزیده شده و نور را در فرکانس خاصی که در ناحیه نوار گاف قرار دارد از ساختار عبور دهند. همچنین یک بلور فوتونی نامنظم می‌تواند با تغییر تصادفی ضخامت یا تغییر طول اپتیکی ایجاد شود [19]. در این مقاله ساختار در نظر گرفته شده، یک بلور فوتونی دو لایه‌ای نامنظم است که شامل یک لایه نقص دی‌الکتریک می‌باشد. طیف عبوری در دو حالت بی‌نظمی ضخامت و طول اپتیکی لایه و برای دو ساختار متقارن و نامتقارن تحت زوایای فرودی مختلف بررسی می‌شود.

تئوری

ساختاری در نظر بگیرید که از دو لایه دی‌الکتریک با آرایش $Air / (n_H n_L)^N n_D (n_L n_H)^N / S$ برای متقارن و $Air / (n_H n_L)^N n_D (n_H n_L)^N / S$ برای حالت نامتقارن ساخته شده است (شکل 1). n_L ، n_H و n_D به ترتیب ضریب شکست لایه اول، دوم و لایه نقص واقع در زیر لایه S هستند. Air نیز هوا است. ضخامت واقعی لایه‌های 1 و 2 به ترتیب $d_H = l_0 / 4n_H$ و

$d_L = l_0 / 4n_L$ بوده که l_0 طول موج طراحی و N نشان دهنده تعداد تناوب‌ها در ساختار است. بی‌نظمی توسط توزیع آماری مربوط به ضخامت لایه‌ها که درجه بی‌نظمی D نامیده می‌شود قابل توصیف است که به صورت زیر تعریف می‌شود [19].

$$D = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_{H,i} - d_H)^2 + (d_{L,i} - d_L)^2}}{d_H + d_L} \quad (1)$$



شکل 1. ساختار بلور فوتونی یک بعدی دو لایه‌ای بی‌نظم با نقص دی‌الکتریک. الف) ساختار متقارن

$$Air / (n_H n_L)^N n_D (n_L n_H)^N / S$$

نامتقارن

$$Air / (n_H n_L)^N n_D (n_H n_L)^N / S$$

که d_H و d_L ضخامت واقعی و $d_{H,i}$ و $d_{L,i}$ ضخامت‌های لایه در حضور بی‌نظمی در تناوب نام است. به طور کلی $d_{H,i}$ ، $d_{L,i}$ ، d_H و d_L با روابط زیر به پارامترهای متغیر Dx_H و Dx_L (تغییر ضخامت‌ها در تناوب) مربوط می‌شوند.

$$d_{L,i} = d_L + m_i Dx_L; d_{H,i} = d_H + m_i Dx_H \quad (2)$$

که اعداد m_i به صورت تصادفی از توزیع گوسی حول d_L و d_H انتخاب است. برای لایه‌ای که فاقد بی‌نظمی است $m_i = 0$ می‌باشد. برای $m_i < 0$ ضخامت لایه بی‌نظم کمتر از ضخامت واقعی و برای $m_i > 0$ ضخامت لایه بی‌نظم بیشتر از مقدار واقعی آن است. ابتدا یک مقدار ثابت برای درجه بی‌نظمی در نظر می‌گیریم؛ سپس با در نظر گرفتن بی‌نظمی لایه اول $Dx_L = 0$ و $0 < Dx_H$ و انتخاب مقادیر مختلف برای m_i ها با

$$P_{H,i} = \begin{pmatrix} \alpha e^{ij_{H,i}} & 0 & \ddot{\circ} \\ \epsilon & 0 & e^{-ij_{H,i}} \frac{\ddot{\circ}}{\epsilon} \end{pmatrix} \quad (9)$$

که فاز به صورت $f_{H,i} = 2\pi n_H d_{H,i} \cos q_H / \lambda$ با λ به عنوان طول موج فرودی است به صورت مشابه $P_{L,i}$ را نیز می‌توان تعریف کرد؛ به طوری که $f_{L,i} = 2\pi n_L d_{L,i} \cos q_L / \lambda$ در نهایت ضریب عبور t را می‌توان برحسب عناصر ماتریس انتقال کل M به صورت زیر نوشت

$$t = 1/M_{11} \quad (10)$$

بنابراین عبور به صورت زیر است:

$$T = \frac{n_s \cos q_s}{n_0 \cos q_0} |r|^2 \quad (11)$$

نتایج عددی و بحث در نتایج

حال یک حالت ویژه از این ساختار را در نظر می‌گیریم. لایه‌های اول و دوم به ترتیب (ZnS) با $n_H = 2/3$ و (MgF₂) با $n_L = 1/38$ در نظر گرفته شده‌اند. ضریب شکست لایه نقص نیز برابر با $n_D = 1.4$ است. زیر لایه شیشه با ضریب شکست $n_s = 1/52$ ، $n_A = n_0 = 1$ و طول موج طراحی $\lambda_0 = 500\text{nm}$ است. مقادیر اعداد گسسته m برای $i = 1, \dots, N$ به صورت 4، 13، 15، 26 و 40 برای تعداد تناوب $N = 5$ در نظر گرفته شده است.

بی‌نظمی ضخامت در حالت متقارن

در شکل 2، نمودار طیف بازتابی ساختار متقارن مربوط به بی‌نظمی ضخامت لایه H برای مقادیر مختلف درجه بی‌نظمی و دو زاویه فرودی صفر و 45 درجه در هر دو قطبش رسم شده است.

در زاویه صفر درجه طیف عبوری در هر دو قطبش بر هم منطبق است. همان‌طور که از نمودار شکل 2 دریافت می‌شود، در هر دو قطبش با افزایش مرتبه بی‌نظمی، مد

جایگذاری (2) در (1) مقدار Dx_H را محاسبه می‌کنیم. روش دیگر برای ایجاد بی‌نظمی، بر اساس طول اپتیکی است که در این حالت درجه بی‌نظمی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{\epsilon}_{n_H}^2 (d_{H,i} - d_H)^2 + n_L^2 (d_{L,i} - d_L)^2}}{n_H d_H + n_L d_L} \quad (3)$$

در اینجا نیز مقادیر ضخامت واقعی و ضخامت در حضور بی‌نظمی با همان رابطه (2) به مقدار تغییر ضخامت Dx ها مربوط می‌شوند. برای محاسبه مقدار عبور در زاویه فرودی q_0 از روش ماتریس انتقال استفاده می‌کنیم ماتریس انتقال کل با رابطه زیر توصیف می‌شود

$$M = \begin{pmatrix} \alpha M_{11} & M_{12} \ddot{\circ} \\ \epsilon M_{21} & M_{22} \frac{\ddot{\circ}}{\epsilon} \end{pmatrix} \quad (4)$$

که به صورت زیر برای حالت متقارن و نامتقارن محاسبه می‌شود

$$M_{\text{sym}} = D_A^{-1} \hat{O} \hat{\epsilon} D_H P_{H,i} D_H^{-1} D_L P_{L,i} D_L^{-1} \hat{H} \quad (5)$$

$$\hat{\epsilon} D_D P_D D_D^{-1} \hat{H} \hat{O} \hat{\epsilon} D_L P_{L,i} D_L^{-1} D_H P_{H,i} D_H^{-1} \hat{H} P_S$$

$$M_{\text{asym}} = D_A^{-1} \hat{O} \hat{\epsilon} D_H P_{H,i} D_H^{-1} D_L P_{L,i} D_L^{-1} \hat{H} \quad (6)$$

$$\hat{\epsilon} D_D P_D D_D^{-1} \hat{H} \hat{O} \hat{\epsilon} D_H P_{H,i} D_H^{-1} D_L P_{L,i} D_L^{-1} \hat{H} P_S$$

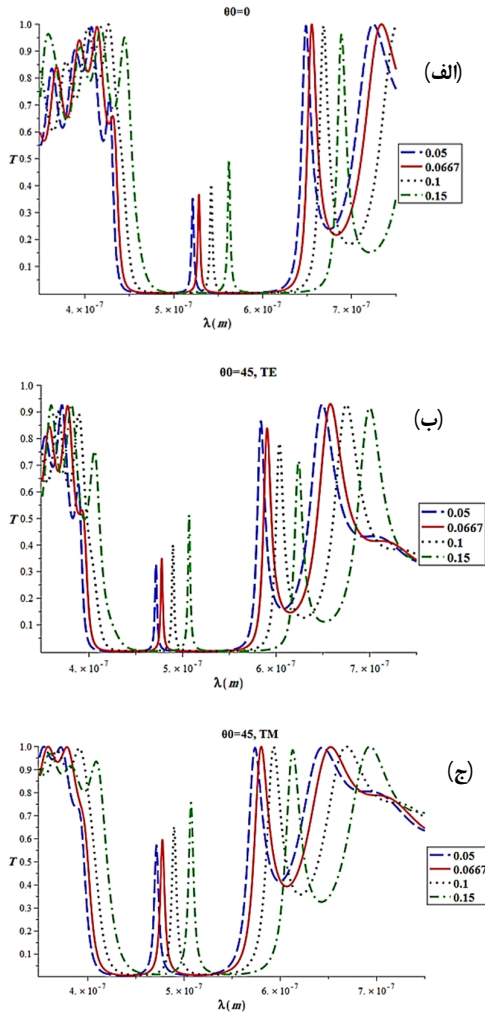
به طوری که ماتریس مربوط به محیط z که وابسته به ضریب شکست و زاویه در هر لایه است، برای قطبش TE و TM به ترتیب با روابط (7) و (8) به صورت زیر داده می‌شود [20]

$$D_j = \begin{pmatrix} \alpha & 1 & 1 & \ddot{\circ} \\ \epsilon n_j \cos q_j & -n_j \cos q_j & \frac{\ddot{\circ}}{j} & \emptyset \end{pmatrix}, j = A(\text{air}), H, L, S \quad (7)$$

$$D_j = \begin{pmatrix} \alpha \cos q_j & \cos q_j & \ddot{\circ} \\ \epsilon & n_j & -n_j \frac{\ddot{\circ}}{j} \end{pmatrix}, j = A(\text{air}), H, L, S \quad (8)$$

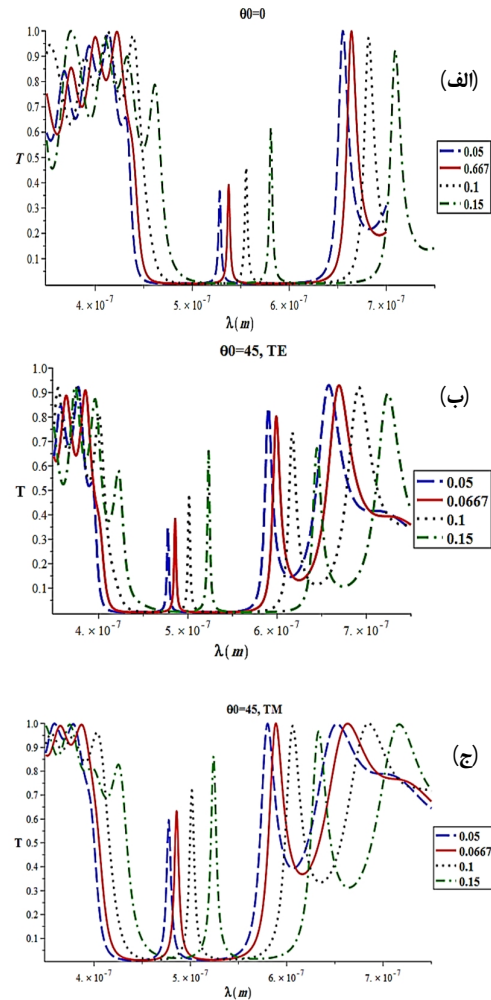
و ماتریس انتقال در لایه H بی‌نظم وابسته به ضخامت واقعی به صورت زیر تعریف می‌شود.

قطبش رسم شده است. در این حالت نیز در زاویه صفر درجه طیف عبوری در هر دو قطبش بر هم منطبق است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مرتبه بی‌نظمی، مد نقص به سمت طول موج‌های بلندتر حرکت می‌کند. اینجا نیز ارتفاع نقص با افزایش مرتبه بی‌نظمی افزایش می‌یابد و میزان عبور در محل مد نقص برای قطبش TM بیشتر از قطبش TE است.



شکل 3. طیف عبوری مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم متقارن با بی‌نظمی طول اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی و زاویه فرودی الف) صفر ب) 45 درجه مد TE ج) 45 درجه مد TM.

نقص به سمت طول موج‌های بلندتر جا به جا می‌شود؛ همچنین میزان عبور در محل مد نقص با افزایش مرتبه بی‌نظمی افزایش می‌یابد و برای مد TM عبور نسبت به مد TE بیشتر است.



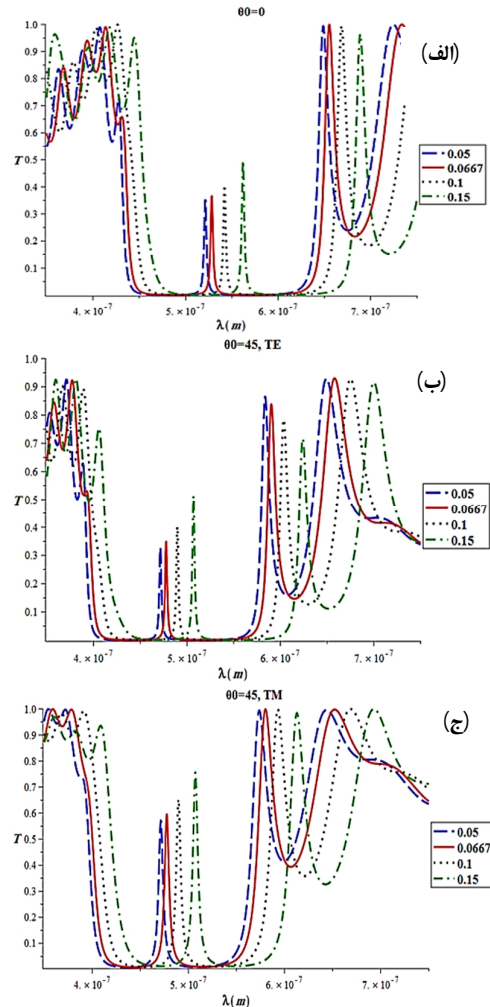
شکل 2. طیف عبوری مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم متقارن با بی‌نظمی ضخامت لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی و زاویه فرودی الف) صفر ب) 45 درجه مد TE ج) 45 درجه مد TM.

بی‌نظمی طول اپتیکی در حالت متقارن

در شکل 3 نمودار طیف عبوری ساختار متقارن مربوط به بی‌نظمی طول اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف درجه بی‌نظمی و دو زاویه فرودی صفر و 45 درجه در هر دو

بی‌نظمی ضخامت در حالت نامتقارن

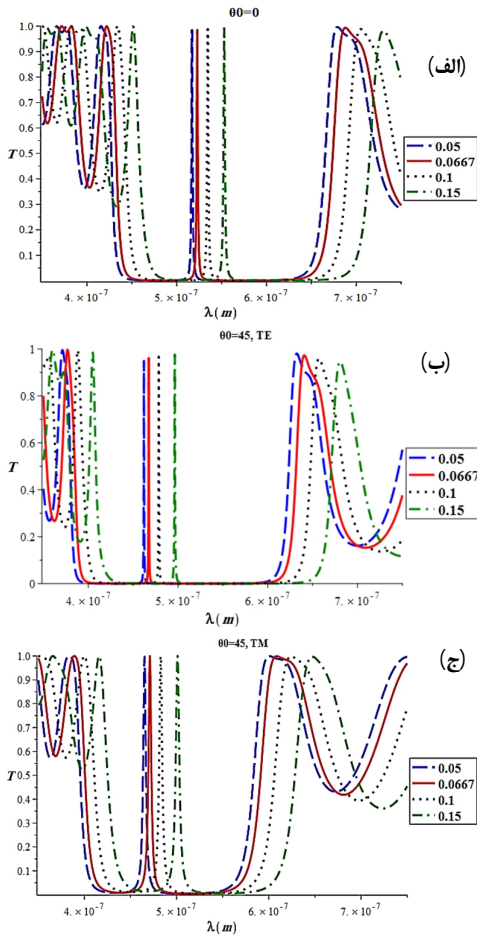
در این بخش ساختار نامتقارن را در نظر می‌گیریم و طیف عبوری را در حالتی که بی‌نظمی مربوط به ضخامت لایه H برای مقادیر مختلف درجه بی‌نظمی و دو زاویه فرودی صفر و 45 درجه در هر دو قطبش رسم می‌کنیم. در این حالت نیز در زاویه صفر درجه طیف عبوری در هر دو قطبش بر هم منطبق است (شکل 4). در شکل 4 دیده می‌شود که با افزایش مرتبه بی‌نظمی در این حالت نیز مد نقص به سمت طول موج‌های بزرگتر جابه‌جا می‌شود؛ ولی در حالت نامتقارن میزان عبور در محل مد نقص تقریباً ثابت است.



شکل 4. طیف عبوری مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم نامتقارن با بی‌نظمی ضخامت لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی و زاویه فرودی الف) صفر ب) 45 درجه مد TE ج) 45 درجه مد TM.

بی‌نظمی طول اپتیکی در حالت نامتقارن

در شکل 5، طیف عبوری در حالتی که طول اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف درجه بی‌نظمی و دو زاویه فرودی صفر و 45 درجه در هر دو قطبش رسم شده است. در این حالت نیز در زاویه صفر درجه طیف عبوری در هر دو قطبش بر هم منطبق است؛ همچنین روند تغییرات مانند حالت قبل افزایشی است. طول موج قله‌های عبور در حالت متقارن و غیر متقارن در جدول 1 و 2 آمده است. همان‌طور که از جدول 1 دیده می‌شود در یک مرتبه بی‌نظمی معلوم با افزایش زاویه فرودی قله‌های عبور در محل مد نقص به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شوند. به علاوه این قله‌ها در قطبش TE نسبت به TM در طول موج بالاتری قرار دارند.



شکل 5. طیف عبوری مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم نامتقارن با بی‌نظمی طول اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی و زاویه فرودی الف) صفر ب) 45 درجه مد TE ج) 45 درجه مد TM.

برای دو مد TE و TM رسم کردیم. در حالت متقارن با افزایش بی‌نظمی در ضخامت و طول اپتیکی، مد نقص به سمت طول موج‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی در حالت نامتقارن بیشتر است. به علاوه در یک مرتبه بی‌نظمی معلوم و تحت هر دو قطبش با افزایش زاویه فرودی قلّه عبوری در محل، مد نقص به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود. همچنین در هر دو ساختار

همان طور که در جدول 2 دیده می‌شود، در هر دو ساختار و هر دو قطبش با افزایش زاویه فرودی، مدهای نقص به سمت طول موج‌های بلندتر جابه‌جا می‌شوند. در ساختار نامتقارن در زوایای کمتر برای هر دو حالت بی‌نظمی طول موج‌ها در دو قطبش تقریباً یکسان است. با افزایش زاویه فرودی اختلاف طول موج مد نقص در دو قطبش افزایش می‌یابد؛ به طوری که در زاویه 60 درجه این اختلاف بیشترین مقدار خود را دارد.

جدول 1. طول موج‌های مد نقص مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم در ساختار متقارن در دو حالت بی‌نظمی ضخامت و طول

اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی در زوایای فرودی مختلف و هر دو قطبش TE و TM

طول موج مدهای نقص (nm) (بی‌نظمی طول اپتیکی)		طول موج مدهای نقص (nm) (بی‌نظمی ضخامت)		مرتبه بی‌نظمی	زاویه فرودی (درجه)
TE مد	TM مد	TE مد	TM مد		
520/4	520/4	527/4	527/4	0/0500	$q_0 = 0$
527/4	527/4	537/2	537/2	0/0667	
541/6	541/6	554/5	554/5	0/1000	
561/5	561/5	580/5	580/5	0/1500	
496/6	496/9	503/5	502/5	0/0500	$q_0 = 30$
503/4	503/5	512/3	512/5	0/0667	
516/6	515/9	528/6	529/4	0/1000	
534/7	534/9	553/1	553/2	0/1500	
470/3	471/0	477/0	476/6	0/0500	$q_0 = 45$
476/9	569/7	485/5	484/3	0/0667	
489/6	577/5	499/9	500/3	0/1000	
507/0	585/4	522/8	523/2	0/1500	
442/7	442/0	448/3	446/3	0/0500	$q_0 = 60$
448/2	449/0	456/7	455/6	0/0667	
459/7	458/9	468/6	469/8	0/1000	
476/0	474/5	489/7	492/1	0/1500	

متقارن و نامتقارن طول موج‌های مد نقص در حالت بی‌نظمی ضخامت، نسبت به طول موج در حالت بی‌نظمی طول اپتیکی بزرگ‌تر است. در حالت نامتقارن با افزایش مرتبه بی‌نظمی تقریباً میزان عبور در محل مد نقص ثابت است؛ در حالی که در ساختار متقارن با افزایش مرتبه بی‌نظمی، میزان عبور در محل مد نقص افزایش می‌یابد.

بحث و نتیجه‌گیری

با استفاده از روش ماتریس ابتدا انتقال، عبور مربوط به ساختار بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم با نقص دی‌الکتریک را محاسبه کردیم؛ سپس نمودار مربوط به طیف عبوری ساختار متقارن و نامتقارن را در دو حالت بی‌نظمی مربوط به ضخامت و طول اپتیکی و تحت زوایای فرودی مختلف

جدول 2. طول موج‌های مد نقص مربوط به بلور فوتونی دو لایه‌ای بی‌نظم در ساختار نامتقارن در دو حالت بی‌نظمی ضخامت و طول اپتیکی لایه H برای مقادیر مختلف مرتبه بی‌نظمی در زوایای فرودی مختلف و هر دو قطبش TE و TM

طول موج مدهای نقص (nm) (بی‌نظمی طول اپتیکی)		طول موج مدهای نقص (nm) (بی‌نظمی ضخامت)		مرتبه بی‌نظمی	زاویه فرودی (درجه)
مد TM	مد TE	مد TM	مد TE		
515/8	515/8	522/6	522/6	0/0500	$q_0 = 0$
522/4	522/4	529/8	529/8	0/0667	
534/6	534/6	545/9	545/9	0/1000	
552/0	552/0	570/9	570/9	0/1500	
491/4	490/2	496/7	495/9	0/0500	$q_0 = 30$
497/5	496/0	505/0	504/7	0/0667	
508/1	506/3	520/6	519/7	0/1000	
530/0	526/2	547/0	545/1	0/1500	
463/4	461/3	470/9	469/6	0/0500	$q_0 = 45$
471/3	467/4	478/8	476/9	0/0667	
482/5	478/2	494/5	492/4	0/1000	
500/3	496/5	519/6	517/8	0/1500	
437/4	429/3	442/2	439/1	0/0500	$q_0 = 60$
442/5	435/5	449/6	447/0	0/0667	
454/0	446/6	466/0	461/7	0/1000	
472/1	465/2	490/6	488/2	0/1500	

References

- [1] Saleh BE, Teich MC, Saleh BE. Fundamentals of photonics: Wiley New York; 1991.
- [2] Skorobogatiy M, Yang J. Fundamentals of photonic crystal guiding: Cambridge University Press; 2009.
- [3] Sukhoivanov IA, Guryev IV. Photonic crystals: physics and practical modeling: Springer; 2009.
- [4] Gharaati A, Zare Z. Photonic band structures and enhancement of omnidirectional reflection bands by using a ternary 1D photonic crystal including left-handed materials. Progress In Electromagnetics Research. 2011; 20: 81-94.
- [5] Zare Z, Gharaati A. Investigation of band gap width in ternary 1D photonic crystal with left-handed layer. Acta Physica Polonica A. 2014; 125(1): 36-8.
- [6] Banerjee A. Enhanced refractometric optical sensing by using one-dimensional ternary photonic crystals. Progress in Electromagnetics Research. 2009; 89: 11-22.
- [7] Barati M, Aghajamali A. Near-infrared tunable narrow filter properties in a 1D photonic crystal containing semiconductor metamaterial photonic quantum-well defect. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. 2016; 79: 20-25.
- [8] Chaves FS, Posada HV. Tuning of transmittance spectrum in a one-dimensional superconductor-semiconductor photonic crystal. Physica B: Condensed Matter. 2018; 543: 7-13.
- [9] Gharaati A, Zare Z. The effect of temperature on one-dimensional nanometallic photonic crystals with coupled defects. Pramana. 2017; 88(5): 75.
- [10] Gharaati A, Azarshab H. Characterization of defect modes in one dimensional ternary metallo-dielectric nanolayered photonic crystal. Progress

- in Electromagnetics Research B. 2012; 371: 25-141.
- [11] Entezar S R. Photonic crystal wedge as a tunable multichannel filter. Superlattices and Microstructures. 2015; 82: 33-39.
- [12] Rao W, Song Y, Liu M, Jin C. All-optical switch based on photonic crystal microcavity with multi-resonant modes. Optik-International Journal for Light and Electron Optics. 2010; 121 (21): 1934-1936.
- [13] Chen D, Vincent Tse M L, Tam H Y. Super-lattice structure photonic crystal fiber. Progress in Electromagnetics Research M. 2010; 11: 53-64.
- [14] Liu H, Tan C, Zhu C, Wang Y, Gao Y, Ma H, Cheng D. Simultaneous measurement of temperature and magnetic field based on directional resonance coupling in photonic crystal fibers. Optics Communications. 2017; 391: 111-115.
- [15] Cox J, Singh M, Racknor C, Agarwal R. Switching in Polaritonic-Photonic Crystal Nanofibers Doped with Quantum Dots, Nano letters. 2011; 11(12): 5284-9.
- [16] Fan Q, Li C, Liu W, Lu Y, Zhang D. Polarization-independent waveguides in air holes photonic crystals and its slow light. Optics Communications. 2016; 380: 227-232.
- [17] Gersen H, Karle T, Engelen R, Bogaerts W, Korterik J, Van Hulst N, Krauss T, Kuipers L. Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides. Physical review letters. 2005; 94 (7): 073903.
- [18] Gharaati A, Zare Z. Modeling of thermal tunable multichannel filter using defective metallic photonic crystals. Optica Applicata. 2017; 47(4): 611-9.
- [19] Wu C-J, Rau Y-N, Han W-H. Enhancement of photonic band gap in a disordered quarter-wave dielectric photonic crystal. Progress In Electromagnetics Research. 2010; 100: 27-36.
- [20] Yeh P. Optical waves in layered media: Wiley-Interscience; 2005.