

«مقاله پژوهشی»

## بررسی اثر نقص متقارن مرکزی در عبور و چرخش فاراده در بلور فوتونی مگنتو اپتیکی یک بعدی

عبدالرسول قرائتی<sup>1</sup>، نجمه عباسی تل گری<sup>2\*</sup>

1. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

2. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1400/06/15 تاریخ پذیرش: 1400/08/10

## Study of Asymmetric Defect on Transmission and Faraday Rotation of One-Dimensional Magneto-Optic Phonic Crystal

A. Gharaati<sup>1</sup>, N. Abbasi Tolgari<sup>2\*</sup>

1. Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

2. Department of Physics, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 2021/09/06 Accepted: 2021/11/01

### Abstract

In this article, the effect of creating a central symmetric defect on the Faraday rotation and transmission in a one-dimensional magneto-optic photonic crystal consisting of two dielectric materials and one magneto-optic material has been studied. After creating the defect, the effect of increasing the volume of the defect on the width of band gap and the number of transmitted modes with Faraday rotation in the band gap area has been investigated. The highest rotation achieved in this structure is  $-27^\circ$  and the highest transmission is 0.917.

### Keywords

One-Dimensional Magneto-Optic Photonic Crystal, Faraday Rotation, Transmission, Defect

### چکیده

در این مقاله اثر ایجاد نقص متقارن مرکزی بر روی میزان عبور و چرخش فاراده در بلور فوتونی مگنتو اپتیکی یک بعدی متشکل از دو ماده دی الکتریک و یک ماده مگنتو اپتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از اجاد نقص، اثر افزایش حجم نقص بر روی پهنای نوار گاف و تعداد مدهای هدایتی دارای چرخش فاراده در ناحیه نوار گاف بررسی شده است. بیشترین چرخش به دست آمده در این ساختار  $-27^\circ$  و بیشترین مقدار عبور حاصل شده 0/917 است.

### واژه‌های کلیدی

بلور فوتونی مگنتو - اپتیکی یک بعدی، چرخش فاراده، عبور، نقص

**مقدمه**

در سال‌های اخیر پتانسل موجود در کاربردهای انتشار امواج الکترومغناطیسی در بلورهای فوتونی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. [1-7]. وجود قابلیت‌هایی نظیر جفت‌کننده‌های جهت‌دار [8]، دستگاه‌های تقسیم‌کننده مولتی‌پلکس طول موج [9]، کلیدهای نوری [10]، فیلترهای نوری و فیلترهای چندکانالی [11-12]، لنزهای بلور فوتونی [13]، بلورهای فوتونی پلاسمونی [14-15] و... در ساختارهای مذکور منجر به رشد چشمگیر تحقیقات تجربی و تئوری در این زمینه گردیده است. در ساختار بلور فوتونی می‌توان از فلزات [13] و مواد مغناطیسی [14] نیز استفاده کرد. چنانچه یکی از مواد سازنده بلور فوتونی فعالیت مگنتو اپتیکی داشته باشد و یا در ساختار بلور فوتونی نقص مگنتو اپتیکی ایجاد شود، بلور حاصل بلور فوتونی مگنتو اپتیکی نام دارد [19-15]. بلور فوتونی مگنتو اپتیکی قادر به ایجاد چرخش فاراده هستند [20]. این بلورها در فیبرهای مگنتو اپتیکی [21] ایزولاتورهای بلور فوتونی [22] وجود نقص در ساختار بلور فوتونی بر ویژگی‌ها و توانایی‌های این نسل جدید از بلورهای فوتونی افزوده است [23-26]. از آنجایی که چرخش فاراده مواد مغناطیسی کوچک است، برای رسیدن به میزان چرخش فاراده مطلوب، ضخامت بیشتری از مواد مغناطیسی مورد نیاز است که برای مدارات نوری معضلی به شمار می‌رود. در حالی که بلورهای فوتونی مگنتو اپتیکی این معضل را حل می‌کنند. این بلورها قادرند چرخشی به میزان 45 درجه با ضخامت تنها چند میکرومتر ایجاد کنند [27].

در این مقاله طیف عبور بلور فوتونی دی‌الکتریک یک بعدی به کمک روش ماتریس انتقال [3] محاسبه شده است. سپس با ایجاد یک نقص مغناطیسی و تبدیل بلور فوتونی دی‌الکتریک به بلور فوتونی مگنتو اپتیکی، علاوه بر طیف عبور، چرخش فاراده نیز محاسبه شده است. سپس اثر ایجاد نقص مرکزی متقارن، اثر افزایش حجم نقص و تغییرات به وجود آمده در طیف عبور و چرخش فاراده به دست آمده از ساختار بلور مذکور مورد مطالعه قرار گرفته است.

**بحث‌های نظری**

از روش ماتریس انتقال [28-31] در شبیه‌سازی ساختار لایه‌ای این مقاله استفاده شده است. با حل معادلات

ماکسول و ترکیب با تئوری ماتریس انتقال، یک ماتریس  $4 \times 4$  به دست می‌آید:

$$D = \begin{bmatrix} \cos(k_D \Delta z) & 0 & 0 & \frac{i}{\sqrt{\epsilon_D}} \sin(k_D \Delta z) \\ 0 & \cos(k_D \Delta z) & -\frac{i}{\sqrt{\epsilon_D}} \sin(k_D \Delta z) & 0 \\ 0 & -i\sqrt{\epsilon_D} \sin(k_D \Delta z) & \cos(k_D \Delta z) & 0 \\ i\sqrt{\epsilon_D} \sin(k_D \Delta z) & 0 & 0 & \cos(k_D \Delta z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $\epsilon_D$  ثابت دی‌الکتریک،  $k_D = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_D}$  اعداد موج و  $\Delta z$  ضخامت است که نور حین عبور از دی‌الکتریک می‌پیماید.

هنگامی که نور درون یک لایه دی‌الکتریک با ضخامت  $\Delta z$  حرکت می‌کند که موج فرودی در  $Z_0$  و موج خروجی در  $Z_0 + \Delta z$  قرار دارد، میدان الکترومغناطیسی در صفحه ورودی و خروجی را می‌توان توسط یک ماتریس  $4 \times 4$  ارائه داد.

$$F(Z_0 + \Delta z) = DF(Z_0) \quad (2)$$

ماتریس برای لایه مغناطیسی به شکل زیر است:

$$M = \begin{pmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن عناصر ماتریس عبارتند از:

$$\begin{aligned} M_{00} &= \frac{1}{2} (\cos(k_R \Delta z) + \cos(k_L \Delta z)) \\ M_{01} &= \frac{i}{2} (\cos(k_R \Delta z) + \cos(k_L \Delta z)) \\ M_{02} &= \frac{1}{2} \left( \frac{i}{\sqrt{\epsilon_R}} \sin(k_R \Delta z) - \frac{i}{\sqrt{\epsilon_L}} \sin(k_L \Delta z) \right) \\ M_{03} &= \frac{i}{2} \left( \frac{i}{\sqrt{\epsilon_R}} \sin(k_R \Delta z) - \frac{i}{\sqrt{\epsilon_L}} \sin(k_L \Delta z) \right) \\ M_{10} &= -\frac{i}{2} (\cos(k_R \Delta z) + \cos(k_L \Delta z)) \end{aligned}$$

$$F(Z_0) = \begin{bmatrix} 1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \\ 1 & -C_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{ik(z-z_0)} \\ e^{-ik(z-z_0)} \\ e^{ik(z-z_0)} \\ e^{-ik(z-z_0)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F(Z_0 + \Delta Z) = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & -C_4 & 0 \\ C_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{ik(z-z_0-\Delta Z)} \\ e^{-ik(z-z_0-\Delta Z)} \\ e^{ik(z-z_0-\Delta Z)} \\ e^{-ik(z-z_0-\Delta Z)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن  $C_1 - C_4$  ثابت‌های جفت شده هستند. ثابت‌های مذکور  $R = R_x + R_y$  و عبور  $T = T_x + T_y$  را بازتاب می‌دهند.

$$R_x = |C_1|^2, R_y = |C_2|^2 \quad (7)$$

$$T_x = |C_3|^2, T_y = |C_4|^2 \quad (8)$$

که  $T = 1 - R$  است. در این مقاله تنها عبور و چرخش نور بین لایه‌ها در نظر گرفته شده است، بنابراین مقدار عبور و زاویه چرخش از طریق روابط زیر به دست می‌آید:

$$T = |C_3|^2 + |C_4|^2 \quad (9)$$

$$\theta_F = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2Re(\chi_F)}{1-|\chi_F|^2} \right) \quad (10)$$

که در آن  $\chi_F = \frac{C_3}{C_4}$  است [32].

#### مدل و محاسبات

بلور فوتونی مگنتو اپتیکی به کار رفته در این مقاله از لایه‌های دی‌الکتریک  $SiO_2$  و  $Ta_2O_5$  ساخته شده و ماده تشکیل دهنده لایه‌های نقص Bi:YIG است. ضخامت لایه‌های  $SiO_2$ ،  $Ta_2O_5$  و Bi:YIG به ترتیب 0/30 میکرومتر، 0/15 میکرومتر و 0/60 میکرومتر است. ثابت دی‌الکتریک  $SiO_2$  و  $Ta_2O_5$ ،  $\epsilon_{SiO_2} = 2.01$  و  $\epsilon_{Ta_2O_5} = 4.6$  است. ثابت دی‌الکتریک Bi:YIG  $\epsilon_{Bi:YIG}$

$$M_{11} = \frac{1}{2} (\cos(k_R \Delta Z) + \cos(k_L \Delta Z))$$

$$M_{12} = -\frac{i}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{\epsilon_R}} \sin(k_R \Delta Z) + \frac{1}{\sqrt{\epsilon_L}} \sin(k_L \Delta Z) \right)$$

$$M_{13} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{\epsilon_R}} \sin(k_R \Delta Z) - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_L}} \sin(k_L \Delta Z) \right)$$

$$M_{20} = -\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon_R} \sin(k_R \Delta Z) - \sqrt{\epsilon_L} \sin(k_L \Delta Z))$$

$$M_{21} = -\frac{i}{2} (\sqrt{\epsilon_R} \sin(k_R \Delta Z) + \sqrt{\epsilon_L} \sin(k_L \Delta Z))$$

$$M_{22} = \frac{1}{2} (\cos(k_R \Delta Z) + \cos(k_L \Delta Z))$$

$$M_{23} = \frac{i}{2} (\cos(k_R \Delta Z) - \cos(k_L \Delta Z))$$

$$M_{30} = \frac{i}{2} (\sqrt{\epsilon_R} \sin(k_R \Delta Z) + \sqrt{\epsilon_L} \sin(k_L \Delta Z))$$

$$M_{31} = -\frac{1}{2} (\sqrt{\epsilon_R} \sin(k_R \Delta Z) - \sqrt{\epsilon_L} \sin(k_L \Delta Z))$$

$$M_{32} = -\frac{i}{2} (\cos(k_R \Delta Z) - \cos(k_L \Delta Z))$$

$$M_{33} = \frac{1}{2} (\cos(k_R \Delta Z) + \cos(k_L \Delta Z))$$

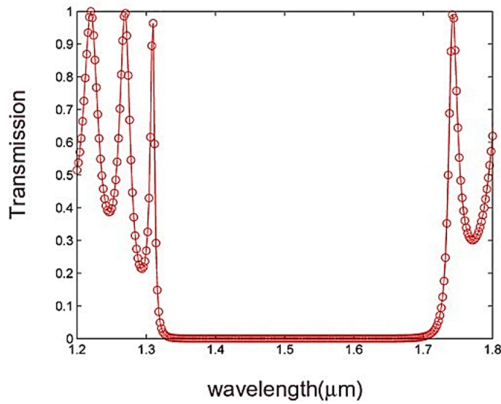
که در آن:

$$k_R = \left( \frac{\omega}{c} \right) \epsilon_R^{1/2}, \quad k_L = \left( \frac{\omega}{c} \right) \epsilon_L^{1/2}$$

هستند. هنگامی که نور درون یک لایه مغناطیسی با ضخامت  $\Delta Z$  حرکت می‌کند، که موج فرودی در  $Z_0$  و موج خروجی در  $Z_0 + \Delta Z$  قرار دارد، میدان الکترومغناطیسی در صفحه ورودی و خروجی را می‌توان توسط یک ماتریس  $4 \times 4$  ارائه داد.

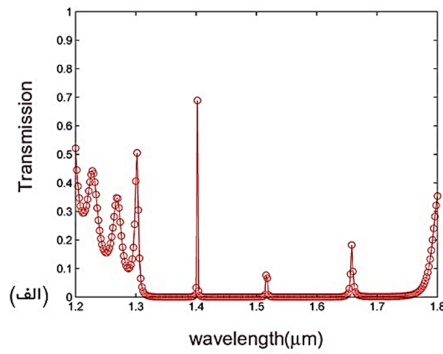
$$F(Z_0 + \Delta Z) = MF(Z_0) \quad (4)$$

برای نور قطبیده TM،  $F(Z_0)$  و  $F(Z_0 + \Delta Z)$  به ترتیب به شکل‌های زیر هستند:

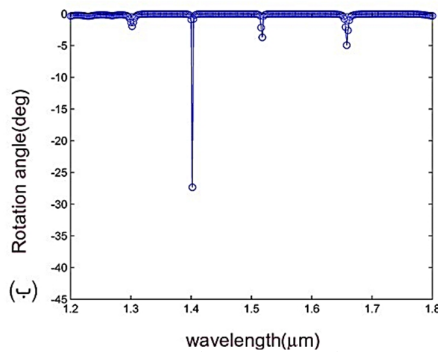


شکل 2. نمودار عبور بلور فوتونی دی‌الکتریک یک بعدی پیش از ایجاد نقص

همان گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، نمودار عبور بلور فوتونی دی‌الکتریک مورد مطالعه دارای نوار گاف وسیعی در محدوده  $(1/33 \mu m)$  تا  $(1/72 \mu m)$  است. در شکل 2 با ایجاد دو ردیف نقص مگنتو اپتیکی و تبدیل بلور فوتونی دی‌الکتریک به بلور فوتونی مگنتو اپتیکی تعدادی مد هدایتی در نوار گاف طیف عبور پدیدار شد که یکی از آنها چرخش فاراده قابل توجهی متنظر با مقدار عبور مناسب دارد. پهنای نوار گاف نیز بیشتر شد.



(الف)



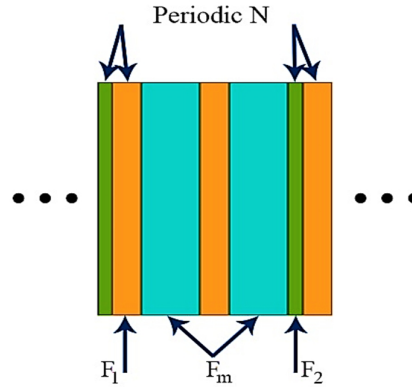
(ب)

شکل 3. الف) نمودار عبور و ب) چرخش فاراده بلور فوتونی یک بعدی پس از ایجاد دو ردیف نقص متقارن مرکزی مگنتو اپتیکی

مقدار  $5.5$  و  $\epsilon_{Bi:YIG} = -1.98 \times 10^{-3}$  است [3]. مقدار عبور و چرخش فاراده برای  $300$  نقطه در فاصله  $\lambda = 1.2 - 1.8 (\mu m)$  محاسبه و نمودارهای مرتبط با آن در شکل‌های 1-5 ترسیم شده است. ساختار قرارگیری لایه‌ها در بلور به شکل زیر است و طرح شماتیک آن در شکل 1 آورده شده است:

$$(F_2 F_1)^N (F_m F_1 F_m) (F_2 F_1)^N$$

$F_1: SiO_2, F_2: Ta_2O_5, F_m: Bi: YIG, N=8$



شکل 1. طرح شماتیک بلور فوتونی یک بعدی متشکل از لایه‌های دی‌الکتریک و نقص مغناطیسی

$(N=8)F_1: SiO_2, F_2: Ta_2O_5, F_m: Bi: YIG,$

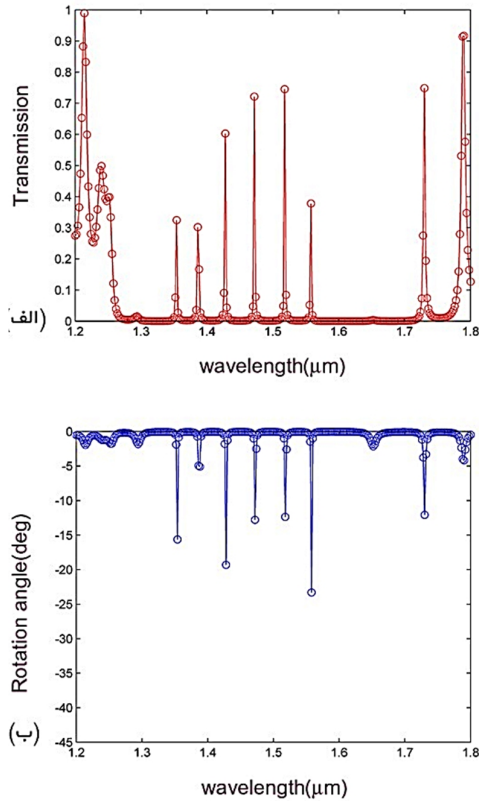
ساختار ابتدایی بلور فاقد نقص به شکل زیر است:

$$(F_2 F_1)^N (F_2 F_1)^N$$

و ساختارهای بررسی شده دارای نقص به ترتیب عبارتند از

$$\begin{aligned} &(F_2 F_1)^{N-1} (F_m F_1 F_m)^2 (F_2 F_1)^{N-1} \\ &(F_2 F_1)^{N-2} (F_m F_1 F_m)^4 (F_2 F_1)^{N-2} \\ &(F_2 F_1)^{N-3} (F_m F_1 F_m)^6 (F_2 F_1)^{N-3} \\ &(F_2 F_1)^{N-4} (F_m F_1 F_m)^8 (F_2 F_1)^{N-4} \end{aligned}$$

در شکل 5 نمودار عبور و چرخش فاراده بلور مذکور پس از گسترش نقص متقارن مرکزی مگنتو اپتیکی به شش ردیف ترسیم شده است. تأثیر افزایش حجم نقص در ساختار ایجاد شده منجر به شکل گیری 5 مد هدایتی با مقدار عبور بالای 0/50 در نوار گاف گردید.



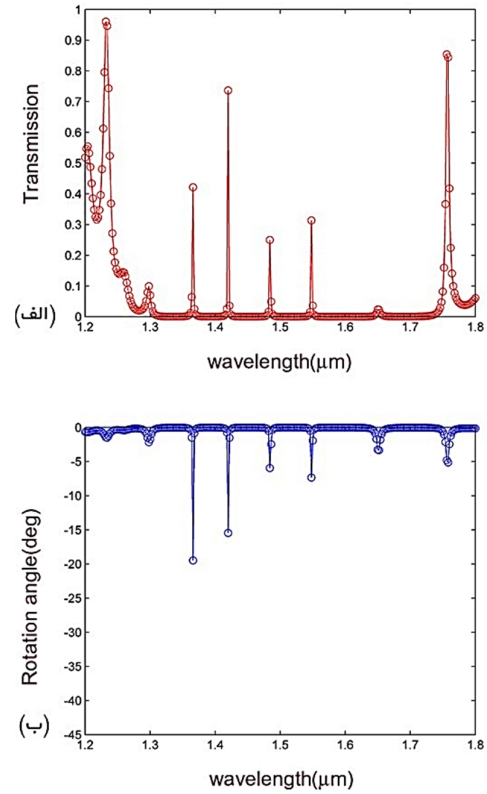
شکل 5. الف) نمودار عبور و ب) چرخش فاراده بلور فوتونی یک بعدی پس از گسترش نقص متقارن مرکزی مگنتو اپتیکی به شش ردیف

نقاط مذکور در جدول 2 درج گردیده است.

جدول 2. عبور و چرخش فاراده متناظر با ساختار دارای 6 ردیف

نقص			
عبور	چرخش فاراده	طول موج (میکرومتر)	تعداد
0/602	-19/29	1/428	1
0/721	-12/77	1/472	2
0/745	-12/36	1/518	3
0/748	-12/05	1/730	4
0/917	-4/18	1/790	5

همان طور که در شکل 3 دیده می شود، در طول موج 1/400، عبوری به میزان 0/688 همراه با چرخش فاراده 27- ایجاد شده است.



شکل 4. الف) نمودار عبور و ب) چرخش فاراده بلور فوتونی یک بعدی پس از گسترش نقص متقارن مرکزی مگنتو اپتیکی به چهار ردیف

سیس با افزایش دو ردیف دیگر به تعداد ردیف های نقص تعداد مدهای هدایتی در نوار گاف با مقدار عبور بالای 0/50 به 3 عدد افزایش یافت. این نقاط به ترتیب در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1. عبور و چرخش فاراده متناظر با ساختار دارای 4 ردیف

نقص			
عبور	چرخش فاراده	طول موج (میکرومتر)	تعداد
0/736	-15/45	1/420	1
0/853	-4/79	1/756	2
0/844	-5/12	1/758	3

جدول 3. عبور و چرخش فاراده متناظر با ساختار دارای 8 ردیف نقص

عبور	چرخش فاراده	طول موج (میکرومتر)	تعداد
0/727	-4/45	1/254	1
0/523	-4/84	1/256	2
0/721	-26/76	1/348	3
0/774	-9/77	1/370	4
0/585	-10/86	1/400	5
0/693	-12/27	1/432	6
0/825	-13/17	1/466	7
0/546	-10/18	1/536	8
0/685	-5/39	1/758	9
0/707	-6/43	1/760	10

همان گونه که در جدول 3 قابل مشاهده است 10 نقطه به دست آمده از طول موج 1/254 آغاز می شوند و در طول موج 1/760 خاتمه می یابند.

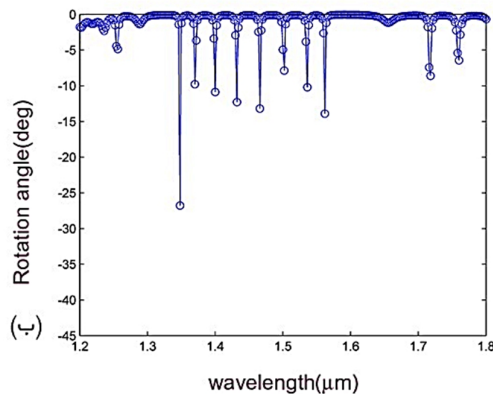
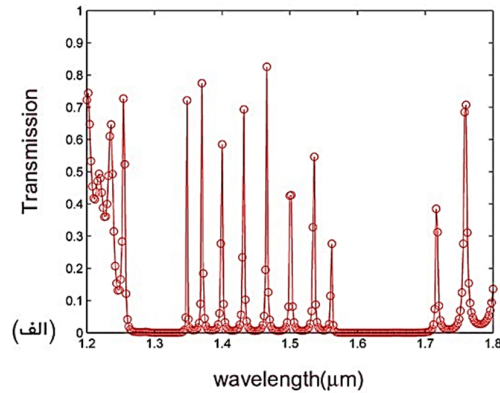
### بحث و نتیجه گیری

افزایش تعداد ردیف های نقص در ساختار بلور فوتونی مگنتو اپتیکی منجر به افزایش پهنای باند گاف و افزایش تعداد مدهای هدایتی در طیف عبور پس از نقص نسبت به حالت فاقد نقص شد. همچنین تعداد نقاط دارای چرخش با عبور بالای مقدار 0/500 از 1 عدد به 10 عدد افزایش یافت. در ساختار بلور مورد بررسی در این مقاله بیشترین عبور به دست آمده متعلق به ساختار دارای 8 ردیف نقص و به میزان 0/917 بود. در حالی که بیشترین مقدار چرخش فاراده متعلق به ساختار دارای 2 ردیف نقص و به مقدار 27- بود. با استفاده از تغییر در میزان حجم نقص می توان مدهای هدایتی و همچنین پهنای نوار گاف را در ساختار بلور فوتونی کنترل کرد.

### References

[1] Liu T, Kobayashi N, Ikeda K, Ota Y, Iwamoto S. Topological Band Gaps Enlarged in Epsilon-Near-Zero Magneto-Optical Photonic Crystals. ACS Photonics. 2022 Apr 27.

همان گونه که در ردیف 4 جدول 2 قابل مشاهده است، یکی از نقاط دارای عبور نزدیک به حداکثر عبور است که مقدار آن 0/917 است. بیشترین مقدار چرخش به دست آمده در ساختار جدید 19/29- و با عبور 0/602 است.



شکل 6. الف) نمودار عبور و ب) چرخش فاراده بلور فوتونی یک بعدی پس از گسترش نقص متقارن مرکزی مگنتو اپتیکی به شش ردیف

پس از افزایش ردیف های نقص به هشت ردیف تعداد مدهای هدایتی در نوار گاف با مقدار عبور بالای 0/500 به 10 عدد افزایش یافت. جدول 3 شرح نقاط مذکور است.

[2] Yu G, Zhang X, Lv Y, Cao R. Unidirectional propagation based on nonreciprocal defect modes in one-dimensional magneto-optical photonic crystals. Optik. 2021 Dec 1;248:166230.

- [3] Forozani G, Abadi AA, Baizae SM, Gharaati A. Structural, electronic and magnetic properties of CoZrIrSi quaternary Heusler alloy: First-principles study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020 Jan 30;815:152449.
- [4] Li T, Yin C, Wu F. Strong optical non-reciprocity in one-dimensional photonic crystal containing a Weyl semimetal-based defect. *Optical Materials*. 2021 Nov 1;121:111583.
- [5] Gaiyan B, Lijuan D, Shuai F, Zhifang F. Faraday effects in one-dimensional magneto-optical photonic crystals. *Optical Materials*. 2012 Dec 1;35(2):252-6.
- [6] Gharaati A, Abed Y, Mostaghni F. Non-linear optical characteristics of N, N'-bis (salicylidene)-p-phenylenediamine: Z-scan technique and quantum mechanical calculations. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*. 2022 May 20;36(2):465-77.
- [7] Gharaati A, Esmaeili F. Bandgap structure and density of states of two-dimensional magnetized plasma photonic crystals. *International Journal of Modern Physics B*. 2022 Jun 27:2250124.
- [8] Sharifi H, Maleknejad M. Multi-functional all-optical photonic crystal logic gate using nonlinear directional coupler. *Optical and Quantum Electronics*. 2021 Dec;53(12):1-3.
- [9] Keiser G. Wavelength division multiplexing (WDM). In *Fiber Optic Communications 2021* (pp. 383-435). Springer, Singapore.
- [10] Giannetti A, Tombelli S. Aptamer optical switches: from biosensing to intracellular sensing. *Sensors and Actuators Reports*. 2021 Nov 1; 3:100030.
- [11] Badri SH, Gilarlue MM, Farkoush SG, Rhee SB. Reconfigurable bandpass optical filters based on subwavelength grating waveguides with a Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> cavity. *JOSA B*. 2021 Apr 1;38(4):1283-9.
- [12] Azarshab H, Gharaati A. A multichannel filter based on ternary nano metallo-dielectric photonic crystal with Thue-Morse defect layer structure. *Microelectronic Engineering*. 2018 Oct 15;198:93-7.
- [13] Gharaati A, Fathi N. Enhancement of resolution imaging of a flat graded photonic crystal lens using negative refractive index. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*. 2021 Nov 24;15(November-December 2021):572-7.
- [14] Zare Z, Gharaati A. Enhancement of transmission in 1D thermal tunable metallic photonic crystal filter with exponential gradation thickness. *The European Physical Journal D*. 2020 Jul;74(7):1-7.
- [15] Gevorgyan AH, Golik SS, Vanyushkin NA, Efimov IM. Magneto-optics of helically structured photonic crystals with wavelength dependence of magneto-optical activity parameter. *Optik*. 2022 Jul 1;261:169208.
- [16] Darki BS, Nezhad AZ. Magneto-optical properties of asymmetric one-dimensional magneto-photonic crystals. *Journal of Optics*. 2018 Dec 17; 21(1):015101.
- [17] Saker K, Lahoubi M, Pu S. Gyrotropy and magnetic fluid dependences of magneto-optical properties in YIG-magnetic photonic crystal fiber. *Journal of Computational Electronics*. 2021 Jun; 20(3): 1326-31..
- [18] Saker K, Bouchemat T, Lahoubi M, Bouchemat M. Enhancement of magneto-optical properties in magnetic photonic crystal slab waveguide based on yttrium iron garnet. In *Journal of Physics: Conference Series 2019 Oct 1* (Vol. 1310, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
- [19] Gharaati A, Tolgari NA. A general method for calculation of Faraday rotation and transmittance in two-dimensional magneto-optic photonic crystals by solving vector-Helmholtz equation in anisotropic media. *Physica Scripta*. 2021 Oct 22;96(12):125517.
- [20] Jalali T, Gharaati A, Rastegar M, Ghaanaatian M. Improvement of the polar

- magneto-optical Kerr effect in the spatial tunable one-dimensional magneto-phonic crystals. *Optik*. 2019 Apr 1;182:949-60.
- [21] Barczak K, Cimek J, Stępień R, Buczyński R. Measurements of Verdet constant in heavy metal oxide glasses for magneto-optic fiber current sensors. *Optical Materials*. 2022 Jan 1;123:111942.
- [22] Zeng X, Russell PS, Wolff C, Frosz MH, Wong GK, Stiller B. Nonreciprocal vortex isolator by stimulated Brillouin scattering in chiral photonic crystal fibre. arXiv preprint arXiv:2203.03680. 2022 Mar 7.
- [23] Gharaati A, Azarshab H. Characterization of defect modes in onedimensional ternary metallo-dielectric nanolayered photonic crystal. *Progress In Electromagnetics Research B*. 2012;37:125-41.
- [24] Gharaati A, Mohamadebrahimi L, Roozitalab Z. Photonic band gap in negative ternary refractive indices of two-dimensional photonic crystal. *Optica Applicata*. 2014;44(4).
- [25] Gharaati A, Serajfard A. Analytical calculation of band gap of a 1D planar ternary photonic crystal by simulating with a symmetric lossless transmission line. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2012;28:101-9.
- [26] Steel MJ, Levy M, Osgood RM. High transmission enhanced Faraday rotation in one-dimensional photonic crystals with defects. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000 Sep;12(9):1171-3.
- [27] Levy M, Huang X, Li R, Yang HC, Bakhru H. Magneto-optic photonic crystals as optical waveguide structures. In *Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices 2004 Oct 8 (Vol. 5515, pp. 30-41)*. SPIE.
- [28] Kato H, Matsushita T, Takayama A, Egawa M, Nishimura K, Inoue M. Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals. *Journal of Applied Physics*. 2003 Apr 1;93(7):3906-11.
- [29] Goto T, Dorofeenko AV, Merzlikin AM, Baryshev AV, Vinogradov AP, Inoue M, Lisyansky AA, Granovsky AB. Optical Tamm states in one-dimensional magnetophotonic structures. *Physical review letters*. 2008 Sep 11;101(11):113902.
- [30] Manzacca G, Paciotti D, Marchese A, Moreolo MS, Cincotti G. *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.* 2007;5:164.
- [31] Gharaati A, Zare Z. The effect of temperature on one-dimensional nanometallic photonic crystals with coupled defects. *Pramana*. 2017 May;88(5):1-6.
- [32] Sakaguchi S, Sugimoto N. Multilayer films composed of periodic magneto-optical and dielectric layers for use as Faraday rotators. *Optics communications*. 1999 Apr 1;162(1-3):64-70.

## 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>)