



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شهید چمران اهواز،  
خوزستان، ایران.  
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



## ویژگی‌های مدهای نقص در یک بلور فوتونی با یک لایه نقص کایرال ساختاری

سیمین شیرین، امیر مدنی و صمد روشن انتظار

گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

Siminshirin<sup>۱</sup>۰۰۰@gmail.com; a-madani @ ubonab.ac.ir; s-roshan@tabriz.ac.ir

چکیده - در این مقاله، خواص مدهای نقص فوتونی در یک بلور فوتونی یک‌بعدی ساخته شده از لایه‌های متناوب محیط دی الکتریک همسانگرد با یک لایه نقص مرکزی متشکل از یک محیط کایرال ساختاری با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی شده است. ماده در کایرال ساختاری دارای تقارن گروه نقطه‌ای  $42m$  است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی دارای یک گاف باند فوتونی ناحیه اپتیکی است. همچنین چهار مد نقص در گاف باند فوتونی مربوطه قابل مشاهده است که ناشی از شکستن تناوب شبکه بلور فوتونی است. نشان داده شده است که زاویه خمشی می‌تواند تعداد و موقعیت این مدهای نقص را در طیف عبور ساختار تغییر دهد.

کلید واژه- بلور فوتونی، زاویه خمشی، محیط کایرال ساختاری، مدهای نقص.

## Properties of Defect Modes in a Photonic Crystal with a Defect Structurally Chiral Layer

Simin Shirin<sup>۱</sup>, Amir Madani<sup>۱</sup>, and Samad Roshan Entezar<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab

<sup>۲</sup> Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

siminshirin<sup>۲</sup>۰۰۰@gmail.com; a-madani @ ubonab.ac.ir; s-roshan@tabriz.ac.ir

**Abstract-** In this paper, the properties of photonic defect modes in a one-dimensional photonic crystal made of alternate layers of isotropic dielectric medium with a central defect layer consisting of a structurally chiral medium have been investigated using the transfer matrix method. The structurally chiral material is taken to possess locally a  $42m$  point group symmetry. The results show that the suggested structure possesses a photonic bandgap in the optical region. Also, four defect modes are created in the photonic bandgap due to the breaking of the periodicity of the photonic crystal lattice. It is shown that the tilt angle can change the number and position of these defect modes in transmission spectra of the structure.

Keywords: photonic crystal, tilt angle, structurally chiral medium, defect modes.

Commented [D۱]: اندازه فونت ۱۴ شود.

Commented [D۲]: اندازه فونت ۱۲ شود.

Commented [D۳]: مطابق با نمونه مقاله نیست.

Commented [D۴]: مطابق با نمونه مقاله نیست.

Commented [D۵]: مطابق با نمونه مقاله نیست. اندازه فونت اصلاح شود.

## مقدمه

در دهه‌های گذشته بلورهای فوتونی بعنوان موادی مصنوعی که ساختاری با خواص اپتیکی متناوب دارند، توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده‌اند [۱]. یکی از مشخصه‌های اصلی بلور فوتونی جایگزیده کردن نور حول نقص ایجاد شده در ساختار می‌باشد. از این پدیده در طراحی فیلترهای باند عبوری نازک، لیزرهای با آستانه پایین و ارتباطات نوری استفاده می‌شود [۲]. از طرفی قابلیت تنظیم و کنترل فرکانس مد نقص می‌تواند مزیت عمده‌ای در این ادوات به حساب آید. این امر با انتخاب موادی با پارامترهای اپتیکی قابل کنترل بعنوان نقص امکان پذیر می‌باشد.

مواد کایرال ساختاری به دلیل ویژگی‌های متفاوت و جذاب، بعنوان یک موضوع فعال تحقیقاتی در حوزه اپتیک و فوتونیک مطرح می‌باشند. این ساختارها از محیط‌های پیوستار و ناهمگن با تغییرات مارپیچی دی‌الکتریک ناهمسانگرد در طول یک محور ثابت تشکیل شده‌اند که بطور گسترده‌ای توسط نویسندگان متعددی به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۳].

نمونه‌هایی از مواد کایرال ساختاری شامل بلورهای مایع کلستریک و الاستومرها و لایه‌های نازک مجسمه‌سازی شده می‌باشد [۴]. از آنجایی که مشخصه‌های اپتیکی چنین ساختارهایی از طریق تغییر پارامترهای فیزیکی ماده کایرال و یا با اعمال میدان الکتریکی و یا مغناطیسی با فرکانس پایین، تغییر فشار یا دما قابل کنترل است [۵]، این ساختارها یک ماده مناسب برای المان‌های نوری قابل کنترل می‌باشد. از این رو در این مقاله ما به مطالعه بلور فوتونی یک بعدی حاوی لایه نقص کایرال ساختاری با تقارن  $42m$  می‌پردازیم و کنترل مدهای نقص این ساختار را با تغییر زاویه خمش مورد مطالعه قرار می‌دهیم. از مواد کایرال ساختاری با تقارن گروه نقطه  $42m$  می‌توان به آمونیوم دی هیدروژن فسفات و پتاسیم دی هیدروژن فسفات اشاره کرد [۶].

## بیان مساله

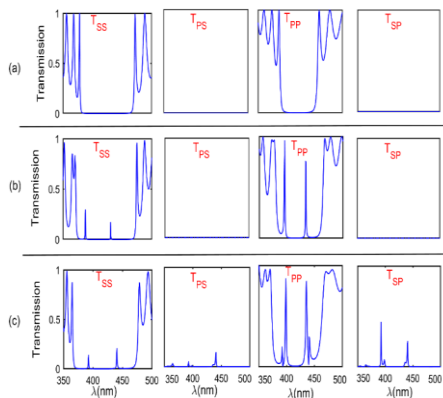
یک ساختار لایه‌ای یک بعدی حاوی نقص با آرایش  $D(AB)^N$  (شکل ۱) که در آن A و B دو نوع دی‌الکتریک همسانگرد را نشان می‌دهند که به ترتیب دارای ضخامت‌های  $d_A$  و  $d_B$  و گذردهای نسبی  $\epsilon_A$  و  $\epsilon_B$  می‌باشند. همچنین D لایه نقصی با ضخامت  $d_D$  را نشان می‌دهد. فرض کنید که لایه نقص، یک ماده کایرال ساختاری راستگرد باشد که محور x، محور ناهمگنی و تناوبی آن باشد. موج تختی با قطبش دلخواه تحت زاویه تابش  $\theta$  به موازات صفحه x-y بر بلور فوتونی مورد نظر فرود می‌آید. همچنین محور x را محور ناهمگنی و تناوبی ساختار در نظر بگیرید. می‌توان انتشار امواج در داخل این محیط را با فرم ماتریسی معادله ماکسول زیر بیان کرد.

$$\frac{\partial \psi(x)}{\partial x} = ik_0 A(x) \psi_0(x) \quad (1)$$

که در اینجا  $\psi(x) = (e_y(x), e_z(x), h_y(x), h_z(x))$  مولفه‌های عرضی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بردار موج و  $A(x)$  یک ماتریس  $4 \times 4$  به صورت زیر است:

$$A(x) = \begin{pmatrix} -\frac{k_y \epsilon_{xy}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} & -\frac{k_y \epsilon_{xz}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} & 0 & -\frac{k_y^2 \epsilon_{xy}(x)}{k_0^2 \epsilon_{xx}(x)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\epsilon_{zy}(x) & \frac{k_y^2}{k_0^2} - \epsilon_{zz}(x) & 0 & \frac{k_y \epsilon_{zx}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} \\ \epsilon_{yy}(x) & \epsilon_{yz}(x) & 0 & -\frac{k_y \epsilon_{yz}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{\epsilon_{zx}(x) \epsilon_{xy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & \frac{\epsilon_{zx}(x) \epsilon_{yz}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \\ -\frac{\epsilon_{yz}(x) \epsilon_{xy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & -\frac{\epsilon_{yz}(x) \epsilon_{xz}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

در رابطه بالا  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  عدد موج در فضای آزاد،  $\lambda$  طول موج خلأ و  $\epsilon_{i,j}(x)$  (i, j = x, y, z) عناصر تانسور دی‌الکتریک کایرال ساختاری در سیستم مختصات xyz می‌باشد. با استفاده از روش ماتریس انتقال [۷]، می‌توان ماتریس انتقال کل ساختار دوره‌ای را با رابطه زیر بدست آورد

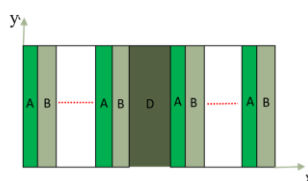


شکل ۲: طیف های عبوری هم قطبش و پادقطبش خطی به صورت تابعی از طول موج در (a) غیاب لایه نقص، (b) با یک لایه نقص ناهمسانگرد پادکایرال تک محوری با گذردهی های دی الکتریکی  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.7$ ،  $\epsilon_3 = 3.2$  و ضخامت  $d_D = 3 \times p$  با یک لایه نقص کایرال ساختاری با  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.7$ ،  $\chi = 45^\circ$  و  $\epsilon_3 = 3.2$ .

که در طیف عبوری از یک بلور فوتونی با یک لایه نقص ناهمسانگرد تک محوری بدون خاصیت کایرالیته (پادکایرال) ایجاد می شود با طیف عبور بلور فوتونی با همان مشخصات اپتیکی اما با یک لایه نقص حاصل از یک ماده با خاصیت کایرالیته متفاوت است (قسمت b و c). در مورد نقص پادکایرال که یک لایه نقص ناهمسانگرد تک محوری معمولی انتخاب شده است، مشاهده می کنیم که امواج هم قطبش، عبور قابل توجهی را در مقایسه با حالات دیگر نشان می دهند. علاوه بر این، در طیف عبور امواج هم قطبش دو مد نقص در طول موجهای  $\lambda = 395.5 \text{ nm}$  و  $\lambda = 433.5 \text{ nm}$  برای امواج هم قطبش P و در طول موجهای  $\lambda = 388 \text{ nm}$  و  $\lambda = 430.5 \text{ nm}$  برای امواج هم قطبش S مشاهده می کنیم که در هر دو مورد مد نقص در طول موجهای کوتاهتر عبور بیشتری نسبت به طول موج بلندتر دارند. همچنین از مقایسه مدهای نقص امواج هم قطبش S و P مشاهده می کنیم که در امواج هم قطبش P مدهای نقصی با عبورهای بزرگتری نسبت به عبور مدهای نقص امواج هم قطبش S ایجاد شده است. با این وجود، وقتی

$$M_{to} = (M_A \cdot M_B)^N M_D (M_A \cdot M_B)^N \quad (3)$$

که در اینجا N تناوب ساختار لایه ای است.  $M_D$  و  $M_A$  و  $M_B$  نیز به ترتیب ماتریس های انتقال لایه های دی الکتریک همسانگرد A و B و لایه نقص D می باشد. همچنین با اعمال شرایط مرزی می توان ضرایب بازتاب و عبور بلور فوتونی حاوی لایه نقص کایرال ساختاری را بدست آورد.



شکل ۱: طرح یک بلور فوتونی یک بعدی با یک لایه نقص ساخته شده از یک محیط کایرال ساختاری

### نتایج و بحث

در مدل پیشنهادی ما لایه های دی الکتریک A و B به ترتیب با گذردهی های الکتریکی  $\epsilon_A = 2.5$ ،  $\epsilon_B = 4.25$  و با ضخامت  $d_A = 80 \text{ nm}$ ،  $d_B = 50 \text{ nm}$  انتخاب شده اند. دوره تناوب ساختار  $N = 8$  است. فرض می کنیم که لایه نقص D یک ماده کایرال ساختاری راستگردی با ضخامت  $d_D = 3 \times p$  که  $p = 270 \text{ nm}$  گام ساختار است. ماده کایرال ساختاری با تقارن گروه نقطه ای  $\bar{4}2m$  و با گذردهی های دی الکتریکی  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.7$  و  $\epsilon_3 = 3.2$  تشکیل شده است. ما نتایج اصلی محاسباتمان را که مقایسه طیفهای عبوری یک بلور فوتونی با یک لایه نقص کایرال ساختاری با زاویه خم  $\chi = 45^\circ$  (قسمت c) با بلور فوتونی بدون نقص (قسمت a) و نقص پادکایرال (قسمت b) است، به صورت تابعی از طول موج در  $\theta = 45^\circ$  در شکل ۲ رسم کرده ایم. از مقایسه قسمت a این شکل با قسمتهای دیگر بدیهی است که مدهای نقص در طیف عبور هم قطبش به دلیل وجود یک لایه نقص که چه کایرال باشد یا چه کایرال نباشد، ایجاد شده است. با این وجود همانطوری که انتظار داریم مد نقصی

شده است. با افزایش زاویه خمش فاصله بین مدهای ۱ و ۲ از  
همدیگر و مدهای ۳ و ۴ از همدیگر کاهش می یابد، تا اینکه  
در  $\chi = 90^\circ$  که حالت شبه همسانگرد می باشد، مدهای  
۱ و ۲ و مدهای ۳ و ۴ بر هم منطبق می شوند و تنها دو مد نقص  
۱ و ۲ در طول موج های  $\lambda = 401.5 \text{ nm}$  و  $\lambda = 441.5 \text{ nm}$  با  
بیشترین شدت مشاهده می شوند.

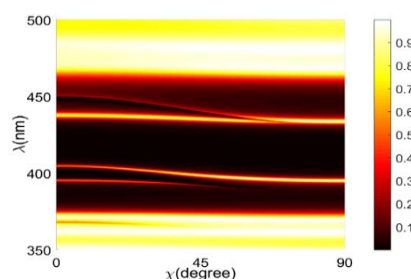
### نتیجه گیری

در این مقاله اثر نقص کایرال ساختاری بر خواص تراگیسل  
یک ساختار لایه ای یک بعدی حاوی نقص مورد مطالعه قرار  
گرفته است. نتایج بیانگر وجود ۴ مد نقص در طیف عبور  
امواج هم قطبش p است که تعداد، فرکانس و شدت مدهای  
نقص مربوطه با افزایش زاویه خمش ساختار تغییر می کنند.

### مراجع

- [۱] J. Joannopoulos, S. Johnson, J. Winn, R. Meade, "photonic crystals: modeling the flow of light," Princeton university press, ۲۰۱۱.
- [۲] K.J. Lee, J. Wu, K. Kim, "Defect modes in a one-dimensional photonic crystal with a chiral defect layer," Optical Materials Express, Vol. ۴, No. ۱۲, pp. ۲۵۴۲-۲۵۵۰, ۲۰۱۴.
- [۳] Faryad, M. and Lakhtakia, A., "The circular Bragg phenomenon," Advances in Optics and Photonics, vol. ۶, pp. ۲۲۵-۲۹۲, ۲۰۱۴.
- [۴] J. Reyes, A. Lakhtakia, "Electrically controlled optical bandgap in a structurally chiral material," Opt. Commun., Vol. ۲۵۹, No. ۱, pp. ۱۶۴-۱۷۳, ۲۰۰۶.
- [۵] C. Avendaño, J. Reyes, "Mechanically tuned defect mode multiplet for cholesteric photonic elastomers," Phys. Rev. E., Vol. ۸۵, ۰۵۰۲, ۰۵۰۲۱۷۰۲, ۲۰۱۲.
- [۶] A. Lakhtakia, "Ambichiral, electro-optic, circular-polarization rejection filters: theory," Physics Letters A, vol. ۳۵۴, pp. ۳۳۰-۳۳۴, ۲۰۰۶.
- [۷] D. Berreman, "Optics in smoothly varying anisotropic planar structures: application to liquid-crystal twist cells," J. Opt. Soc. Am. Vol. ۶۳, No. ۱۱, pp. ۱۳۷۴-۱۳۸۰, ۱۹۷۳.

نقص یک ماده کایرال ساختاری است، برای امواج هم قطبش  
P، هر مد نقص به دو مد نقص، به دلیل تبدیل قطبش امواج  
قطبیده P به امواج قطبیده S، شکافته می شود. در حالی که  
برای امواج هم قطبش S چنین شکافت مدهایی مشاهده  
نمی شود (قسمت C).



شکل ۳: طیف عبور امواج هم قطبش P، به صورت تابعی از زاویه خمش و  
طول موج برای یک بلور فوتونی حاوی لایه نقص کایرال ساختاری. در این  
شکل نواحی تاریک، گاف های فوتونی ساختار را نشان می دهد. همچنین سایر  
پارامترها مشابه با شکل ۲ است.

ما در اینجا مدهای نقص ناشی از نقص کایرال ساختاری را  
برای حالت هم قطبش p از طول موج های کوتاه تر تا  
طول موج های بلندتر به ترتیب مدهای ۳، ۲، ۱ و ۴ نامگذاری  
کرده ایم. با مقایسه عبور مدهای نقص امواج قطبیده خطی  
در شکل قبل و با توجه به حساسیت بالای ساختار به امواج  
قطبیده خطی با قطبش P در ادامه به بررسی اثر زاویه  
خمش بر طیف عبور امواج هم قطبش P پرداخته ایم و نشان  
داده ایم که چگونه طیف های مد نقص امواج هم قطبش P با  
افزایش زاویه خمش ماده کایرال ساختاری تغییر می کند.  
برای این منظور ما طیف عبوری امواج هم قطبش را در  
صفحه  $(\lambda, \chi)$  تحت تابش مایل با  $\theta = 45^\circ$  در شکل ۳،  
رسم کرده ایم. از این شکل مشخص است که در  $\chi = 0^\circ$   
مدهای نقص ۱ و ۲ با شدت عبور متفاوت در طول موج های  
کوتاه تر  $\lambda = 403 \text{ nm}$ ،  $\lambda = 412.5 \text{ nm}$  و مدهای ۳ و ۴ در  
طول موج های بلندتر  $\lambda = 446.5 \text{ nm}$  و  $\lambda = 457.5 \text{ nm}$  ایجاد