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

Siminshirin۲۰۰۰@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 کایرال‌ساختاری با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی شده است. ماده در کایرال‌ساختاری دارای تقارن گروه نقطه‌ای $\bar{4}2m$ 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 مشاهده‌است که ناشی از شکستن تناوب شبکه بلور فوتونی است. نشان داده شده‌است که زاویه خمش می‌تواند تعداد و موقعیت این مدهای نقص را در طیف عبور ساختار تغییر دهد.

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

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

Simin Shirin۱, Amir Madani۱, and Samad Roshan Entezar۲

۱ Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab
۲ Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran
siminshirin۲۰۰۰@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 $\bar{4}2m$ 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 [D٤]: مطابق با نمونه مقاله نیست.

Commented [D٥]: مطابق با نمونه مقاله نیست. اندازه فونت اصلاح شود.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]

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 با 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 لایه های نازک مجسمه‌سازی شده می‌باشد [۴]. از آنجایی که مشخصه‌های اپتیکی چنین ساختارهایی از طریق تغییر پارامترهای فیزیکی ماده کایرال و یا با اعمال میدان اکتریکی 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 کایرال‌ساختاری با تقارن $\bar{4}2m$ می‌پردازیم و کنترل مدهای نقص این ساختار را با تغییر زاویه خمش مورد مطالعه قرار می‌دهیم. از مواد کایرال ساختاری با تقارن گروه نقطه $\bar{4}2m$ می‌توان به آمونیوم دی هیدروژن فسفات و پتاسیم دی هیدروژن فسفات اشاره‌کرد[۶].

بیان مساله

یک ساختار لایه‌ای یک بعدی حاوی نقص با آرایش $(AB)^N D(AB)^N$ در نظر بگیرید (شکل۱) که در آن A و B دو نوع دی‌الکتریک همسانگرد را نشان می‌دهند که به ترتیب دارای ضخامت‌های d_A و d_B و گذردهی‌های نسبی ε_A و ε_B می‌باشند. همچنین D لایه نقصی با ضخامت d_D را نشان می‌دهد. فرض کنید که لایه نقص، یک ماده کایرال‌ساختاری راستگرد باشد که محور x، محور ناهمگنی و تناوبی آن باشد. موج تختی با قطبش دلخواه تحت زاویه تابش θ به موازات صفحه x-y بر بلور فوتونی مورد نظر فرود می‌آید. همچنین محور x را محور ناهمگنی و تناوبی ساختار در نظربگیرید. می‌توان انتشار امواج در داخل این محیط را با فرم ماتریسی معادله ماکسول زیر بیان کرد.

$$\frac{\partial\psi(x)}{\partial x} = ik_0 A(x)\psi_0(x) \qquad (۱)$$

که در اینجا $\psi(x) = (e_y(x), e_z(x), h_y(x), h_z(x))$، مولفه‌های عرضی میدان‌های‌الکتریکی و مغناطیسی بردار موج و $A(x)$ یک ماتریس ۴×۴ به صورت زیر است:

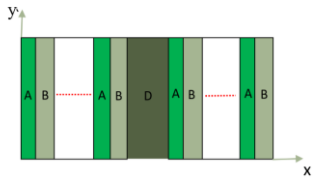
$$A(x) = \begin{pmatrix} -\frac{k_y\varepsilon_{xy}(x)}{k_0\varepsilon_{xx}(x)} & -\frac{k_y\varepsilon_{xz}(x)}{k_0\varepsilon_{xx}(x)} & 0 & -\frac{k_y^2\varepsilon_{xy}(x)}{k_0^2\varepsilon_{xx}(x)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\varepsilon_{zy}(x) & \frac{k_y^2}{k_0^2} - \varepsilon_{zz}(x) & 0 & \frac{k_y\varepsilon_{zx}(x)}{k_0\varepsilon_{xx}(x)} \\ \varepsilon_{yy}(x) & \varepsilon_{yz}(x) & 0 & -\frac{k_y\varepsilon_{yx}(x)}{k_0\varepsilon_{xx}(x)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{\varepsilon_{zx}(x)\varepsilon_{xy}(x)}{\varepsilon_{xx}(x)} & \frac{\varepsilon_{zx}(x)\varepsilon_{xz}(x)}{\varepsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \\ -\frac{\varepsilon_{yx}(x)\varepsilon_{xy}(x)}{\varepsilon_{xx}(x)} & -\frac{\varepsilon_{yx}(x)\varepsilon_{xz}(x)}{\varepsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (۲)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]

$$M_{to} = (M_A . M_B)^N M_D (M_A . M_B)^N \quad (۳)$$

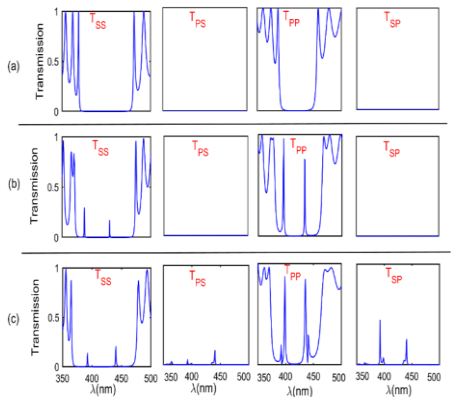
که در اینجا N تناوب ساختار لایه‌ای است. M_A، M_B و M_D نیز به ترتیب ماتریس‌های انتقال لایه‌های دی‌الکتریک همسانگرد A و B و لایه نقص D می‌باشد. همچنین با اعمال شرایط مرزی می‌توان ضرایب بازتاب و عبور بلور فوتونی حاوی لایه نقص کایرال‌ساختاری را بدست آورد.



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 لایه‌های دی الکتریک A و B به ترتیب با گذردهی‌های الکتریکی $\varepsilon_A = 2.5$، $\varepsilon_B = 4.25$ و با ضخامت $d_A = 80\,nm$ ، $d_B = 50\,nm$ انتخاب شده‌اند. دوره تناوب ساختار N =۸ است. فرض می‌کنیم که لایه نقص D یک ماده کایرال‌ساختاری راستگردی با ضخامت $d_D = 3\times p$ که $p = 270\,nm$ گام ساختار است. ماده کایرال ساختاری با تقارن گروه نقطه‌ای $\bar{4}2m$ و با گذردهی های دی الکتریکی $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2.7$ و $\varepsilon_3 = 3.2$ تشکیل شده‌است. ما نتایج اصلی محاسباتمان را که مقایسه طیفهای عبوری یک بلور فوتونی با یک لایه نقص کایرال‌ساختاری با زاویه خمش $\chi = 45^\circ$ (قسمتc) با بلور فوتونی بدون نقص(قسمتa) و نقص پادکایرال(قسمتb) است، به صورت تابعی از طول موج در $\theta = 45^\circ$ در شکل۲ رسم کرده‌ایم. از مقایسه قسمت a این شکل با قسمتهای دیگر بدیهی است که مدهای نقص در طیف عبور هم‌قطبش 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



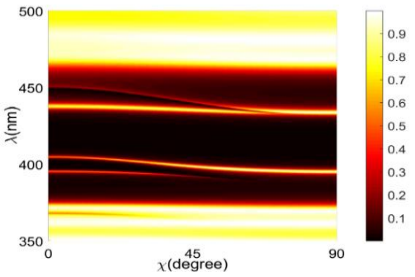
شکل۲: طیف های عبوری هم قطبش و پادقطبش خطی به صورت تابعی از طول‌موج در a) غیاب لایه نقص ، b) با یک لایه نقص ناهمسانگرد پادکایرال تک محوری با گذردهی های دی الکتریکی $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2.7$، $\varepsilon_3 = 3.2$ و ضخامت $d_D = 3\times p$ و c) با یک لایه نقص کایرال ساختاری با $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2.7$، $\varepsilon_3 = 3.2$ و $\chi = 45^\circ$.

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

Commented [T۶]: چپ چین

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]

نقص یک ماده کایرال ساختاری است، برای امواج هم‌قطبش P، هر مد نقص به دو مد نقص، به دلیل تبدیل قطبش امواج قطبیده P به امواج قطبیده S، شکافته می‌شود. در حالی که برای امواج هم‌قطبش S چنین شکافت مدهایی مشاهده نمی‌شود(قسمت c).



شکل ۳: : طیف عبور امواج هم‌قطبش P، به صورت تابعی از زاویه خمش و طول‌موج برای یک بلور فوتونی حاوی لایه نقص کایرال ساختاری. در این شکل نواحی تاریک، گاف های فوتونی ساختار را نشان می‌دهد. همچنین سایر پارامترها مشابه با شکل۲ است.

ما در اینجا مدهای نقص ناشی از نقص کایرال‌ساختاری را برای حالت هم‌قطبش p از طول‌موج‌های کوتاهتر تا طول‌موج‌های بلندتر به ترتیب مدهای ۱،۲،۳و۴ نامگذاری کرده‌ایم. 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 هم‌قطبش P پرداخته‌ایم و نشان داده‌ایم که چگونه طیف‌های مد نقص امواج هم‌قطبش P با افزایش زاویه خمش ماده کایرال‌ساختاری تغییر می‌کند. برای این منظور ما طیف عبوری امواج هم‌قطبش را در صفحه (λ,χ)تحت تابش مایل با $\theta=45^\circ$ در شکل۳، رسم کرده‌ایم. از این شکل مشخص است که در $\chi=0^\circ$ مدهای نقص ۱و۲ با شدت عبور متفاوت در طول‌موج‌های کوتاهتر $\lambda=403nm$، $\lambda=412.5nm$و مدهای ۳و۴ در طول‌موج‌های بلندتر $\lambda=446.5nm$ و $\lambda=457.5nm$ایجاد شده‌است. با افزایش زاویه خمش فاصله بین مدهای ۱و۲ از همدیگر و مدهای ۳و۴ از همدیگر کاهش می‌یابد، تا اینکه در $\chi=90^\circ$ که حالت شبه همسانگرد می‌باشد، مدهای ۱و۲ و مدهای ۳و۴ بر هم منطق می‌شوند و تنها دو مد نقص ۲و ۳ در طول‌موج‌های $\lambda=401.5nm$ و $\lambda=441.5nm$ با بیشترین شدت مشاهده می‌شوند.

نتیجه گیری

در این مقاله اثر نقص کایرال‌ساختاری بر خواص تراگسیل یک ساختار لایه‌ای یک بعدی حاوی نقص مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج بیانگر وجود ۴ مد نقص در طیف عبور امواج هم‌قطبش p است که تعداد، فرکانس و شدت مدهای نقص مربوطه با افزایش زاویه خمش ساختار تغییر می‌کنند.

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. ٤, No. ١٢, pp. ٢٥٤٢-٢٥٥٠, ٢٠١٤.

[۳] Faryad, M. and Lakhtakia, A.,, " The circular Bragg phenomenon," Advances in Optics and Photonics, vol. ٦, pp. ٢٢٥-٢٩٢, ٢٠١٤.

[٤] J. Reyes, A. Lakhtakia, “Electrically controlled optical bandgap in a structurally chiral material,” Opt. Commun., Vol. ٢٥٩, No. ١, pp.١٦٤-١٧٣, ٢٠٠٦.

[٥] C. Avendaño, J. Reyes, “Mechanically tuned defect mode multiplet for cholesteric photonic elastomers,” Phys. Rev. E., Vol. ٨٥, □□.٢, □□.٠٢١٧٠٢, ٢٠١٢.

[٦] A. Lakhtakia, “Ambichiral, electro-optic, circular-polarization rejection filters: theory,” Physics Letters A, vol. ٣٥٤, pp. ٣٣٠-٣٣٤, ٢٠٠٦.

[۷] D. Berreman, “Optics in smoothly varying anisotropic planar structures: application to liquid-crystal twist cells,” J. Opt. Soc. Am. Vol. ٦٣, No.١١, pp. ١٣٧٤–١٣٨٠, ١٩٧٣.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-27]