

تأثیر جهت گیری محور اپتیکی بر رفتار گاف باند ناهمسان گرد فوتونی

زهرا مجرد¹، ربابه طالبزاده^{2*}

1. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
2. استادیار، گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: 1395/11/13 تاریخ پذیرش: 1395/12/18

Influence of the Orientation of Optical Axis on the Behavior of Anisotropic Photonic Band Gap

Z. Mojarad¹, R. Talebzadeh^{*2}

1. Ms.C Student, Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2. Assistant Professor, Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 2017/01/22 Accepted: 2017/03/08

Abstract

In this study, the transmission spectrum of an anisotropic photonic crystal using a transfer matrix method for both of polarization state TE and TM. We showed that the Bragg gap, so called, anisotropic Bragg gap is created in transmission spectrum due to existence of anisotropic layer in structure. The results showed that the anisotropic Bragg gap strongly anisotropic layer and the optical axis of the incident beam angle dependent. The structure of the study can be considered as reflecting all of the frequencies to be used in some way.

Keywords

Photonic Crystal, Anisotropic Band Gap, Optical Axis.

چکیده

در این مطالعه، طیف تراگسیل یک بلور فوتونی ناهمسان گرد یک بعدی با بهره‌گیری از روش ماتریس انتقال برای هر دو حالت قطبش TE و TM مطالعه شده است. نشان دادیم به دلیل وجود لایه ناهمسان گرد در ساختار بلور فوتونی مورد مطالعه، گاف براگ موسوم به گاف باند فوتونی ناهمسان گرد ایجاد می‌شود. نتایج نشان داد که گاف براگ ناهمسان گرد به شدت به جهت محور نوری لایه ناهمسان گرد و زاویه پرتوی فرودی وابسته است. ساختار مورد مطالعه می‌تواند به عنوان بازتابنده تمام سویه در بعضی از فرکانس‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی

بلور فوتونی، گاف باند ناهمسان گرد، محور اپتیکی.

مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه متامواد و کاربرد آنها در بلورهای فوتونی انجام شده است. با به کار بردن این مواد در بلورهای فوتونی یک‌بعدی، می‌توان گاف باند کامل را در این ساختارها مشاهده کرد. در بسیاری از این مطالعات این مواد به صورت همسان‌گرد در نظر گرفته می‌شوند [1-2]. در صورتی که در عمل نشان داده شده که این مواد ناهمسان‌گرد هستند به طوری که می‌توان آنها را به صورت مواد ناهمسان‌گرد تک‌محوری در نظر گرفت. با به کار بردن این مواد در بلورهای فوتونی به همراه مواد راست‌گرد همسان‌گرد، گاف باند کامل قابل مشاهده است [3].

چگونگی به وجود آمدن گاف باند در این ساختارها، نیاز به مطالعه در زمینه مواد ناهمسان‌گرد و تأثیر ناهمسان‌گردی بر انتشار امواج الکترومغناطیسی در این محیطها دارد. همچنین فیلم‌های نازک ناهمسان‌گرد برای بسیاری از سیستم‌های اپتیکی جدید از قبیل موج‌برها، فیلترهای دو شکستی و بسیاری از وسیله‌های نیم‌رسانا کاربرد زیادی دارند.

برای ساختن بسیاری از این وسیله‌ها نیاز به رشد اپتیکی لایه‌های نازک است. از آنجاکه در این وسیله‌های اپتیکی مواد ناهمسان‌گرد به کار رفته است؛ بنابراین طراحی مشخصه‌های این وسیله‌های اپتیکی نیاز به چگونگی انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های ناهمسان‌گرد دارد. علاوه بر آن بیضی‌سنجی (تکنیک اپتیکی برای مشخص کردن مشخصات لایه‌های نازک ناهمسان‌گرد از قبیل راستای محور اپتیکی، ضریب شکست و ضخامت لایه‌های نازک است) سیستم‌های چندلایه‌ای ناهمسان‌گرد نیاز به درک دقیق انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های ناهمسان‌گرد دارد [4].

کنترل‌پذیر بودن یک سیستم تحت عامل خارجی، ویژگی مهم در طراحی یک سیستم به شمار می‌رود. از آنجاکه بسیاری از خواص اپتیکی مواد ناهمسان‌گرد به راستای محور اپتیکی و راستای انتشار بردار موج بستگی دارد. بنابراین تنظیم راستای محور اپتیکی نسبت به

جهت انتشار موج در این مواد، عامل مهمی به شمار می‌آید.

همچنین تأثیرپذیری یک سیستم اپتیکی به وسیله یک عامل خارجی، مانند میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی، برای کنترل خصوصیات اپتیکی آن می‌تواند در بسیاری از کاربردهای بلورهای فوتونی مؤثر واقع شود [5-6]. حضور مواد ناهمسان‌گرد در بلورهای فوتونی، قابلیت کنترل انتشار نور را فراهم می‌آورند و از اهمیت فراوانی در اپتیک و مخابرات برخوردار هستند.

در این مطالعه طیف تراگسیل یک بلور فوتونی یک‌بعدی حاوی لایه‌های همسان‌گرد (موسوم به بلور فوتونی همسان‌گرد) و لایه‌های همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد (موسوم به بلور فوتونی ناهمسان‌گرد) برای هر دو نوع قطبش TE و TM با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی و مقایسه شده است.

مدل نظری و روش ماتریس انتقال

یک ساختار لایه‌ای شامل لایه دی‌الکتریک معمولی A و یک لایه ناهمسان‌گرد B را در نظر می‌گیریم که به صورت پرپودیک کنار هم قرار گرفته‌اند این ساختار را بلور فوتونی ناهمسان‌گرد می‌نامیم.

فرض می‌کنیم محور اپتیکی لایه ناهمسان‌گرد B در صفحه XZ قرار داشته باشد به طوری که زاویه محور اپتیکی با محور Zها برابر ϕ باشد و موج الکتریکی TE با زاویه θ به بلور فوتونی حاوی لایه ناهمسان‌گرد B با ضخامت dB برخورد کند ساختار این بلور فوتونی در شکل 1 نمایش داده شده است.

در این صورت تانسور گذردهی الکتریکی در دستگاه مختصات که به اندازه زاویه ϕ حول محور Y چرخیده به صورت زیر است:

$$\hat{\epsilon} = A e_{p,axis} A^{-1} \quad (1)$$

$$E_y(z) = e^{ia_1 z} (E_1 e^{ia_2 z} + E_r e^{-ia_2 z}) \quad (7)$$

که در آن داریم:

$$a_2 = (w/c) \sqrt{m_{BII} m_{B^A} (ne_{B^A} - \sin^2 q/n^2)} \quad (8)$$

$$a_1 = -\frac{g}{n} k_x$$

با استفاده شرط مرزی پیوستگی میدان الکتریکی و مغناطیسی مماسی در مرز [8]، موج الکترومغناطیسی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$y(z) = \begin{pmatrix} \mathfrak{E} \\ \mathfrak{C} \\ \mathfrak{E} \end{pmatrix} E_y \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} - w m_0 H_x \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} \quad (9)$$

به طوری که میدان الکتریکی و نیز میدان مغناطیسی در دو مکان به وسیله ماتریس انتقال M به صورت زیر با هم مرتبط می شوند [9]

$$y(z) = M_B(Dz, w) y(z + Dz) \quad (10)$$

که می توان ماتریس انتقال برای دو نقطه مورد نظر را به صورت زیر به دست آورد [10]

$$M_B(Dz, w) = \begin{pmatrix} \mathfrak{E} \cos \hat{\theta}_2 Dz & -\frac{i}{q_b} \sin \hat{\theta}_2 Dz \\ \mathfrak{C} i q_b \sin \hat{\theta}_2 Dz & \cos \hat{\theta}_2 Dz \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} \quad (11)$$

و در آن مقدار $q_b = na_2 / (m_{BII} m_{B^A} w/c)$ است.

که در این رابطه ماتریس A، ماتریس دوران حول محور yها و z axis تانسور گذردهی لایه B در مختصات محورهای اصلی هستند (البته در حالتی که محور اپتیکی در راستای محور Zها در نظر گرفته شده است). مقادیر \vec{m} و \vec{e} برای لایه B به وسیله تانسورهای زیر مشخص می شوند [3]

$$\begin{pmatrix} \mathfrak{E} & \mathfrak{O} & \mathfrak{f} \\ \mathfrak{C} & \mathfrak{O} & \mathfrak{O} \\ \mathfrak{E} & \mathfrak{O} & \mathfrak{w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mathfrak{E} & \mathfrak{O} & \mathfrak{g} \\ \mathfrak{C} & \mathfrak{O} & \mathfrak{O} \\ \mathfrak{E} & \mathfrak{O} & \mathfrak{n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن مقادیر درایه های تانسورها به صورت زیر است:

$$p = e_{B^A} \cos^2 j + e_{BII} \sin^2 j \quad (3)$$

$$u = m_{B^A} \cos^2 j + m_{BII} \sin^2 j$$

$$w = e_{B^A} \sin^2 j + e_{BII} \cos^2 j \quad (4)$$

$$n = m_{B^A} \sin^2 j + m_{BII} \cos^2 j$$

$$f = (e_{BII} - e_{B^A}) \sin j \cos j \quad (5)$$

$$g = (m_{BII} - m_{B^A}) \sin j \cos j$$

برای یک موج TE که میدان الکتریکی آن به صورت $E = E_y(z) e^{i(kx - wt)} \hat{y}$ بیان می شود با استفاده از معادلات ماکسول می توان معادله موج را به صورت زیر به دست آورد:

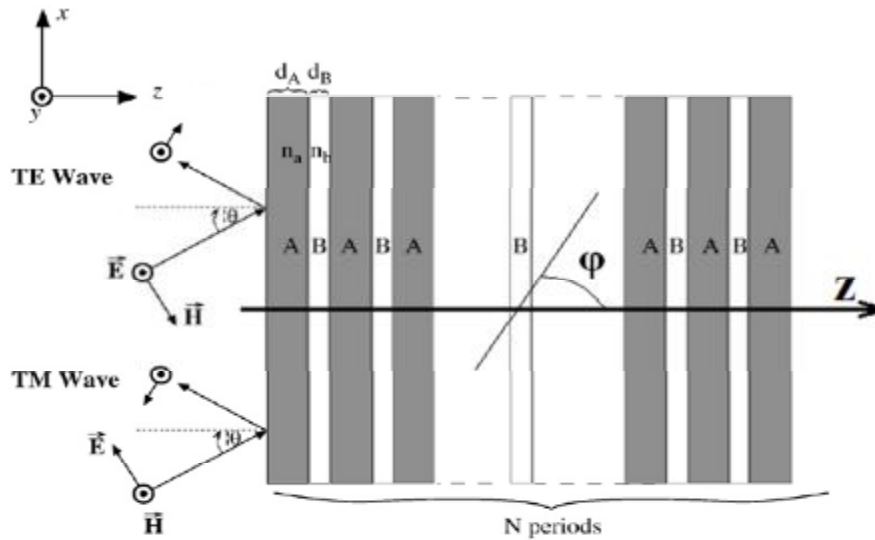
$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + 2i \frac{g}{v} k_x \frac{dE_y}{dz} + \left(\frac{w^2}{c^2} \frac{e_{BII} m_{B^A}}{n} - \frac{u}{n} k_x^2 \right) E_y = 0 \quad (6)$$

با حل این معادله، میدان الکتریکی در داخل محیط ناهمسان گرد B به صورت زیر به دست می آید [7].

$$\epsilon_{B\parallel} = 1 \quad \epsilon_{B\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$$

$$\mu_{B\parallel} = 1 \quad \mu_{B\perp} = 1 - \frac{\omega_m^2}{\omega^2}$$

که با تاباندن پرتوی نور عمودی $\Theta = 0$ برای حالت $\phi = 0$ طیف تراگیسل بلور فوتونی ناهمسان گرد را برحسب فرکانس زاویه‌ای ω در قطبش TE به صورت شکل 2 رسم کردیم مطابق شکل گاف باند اول آن با فرکانس زاویه‌ای مرکزی 45.12GHz و گاف باند دوم



شکل 1. بلور فوتونی حاوی لایه ناهمسان گرد B که محور اپتیکی آن با محور Z زاویه ϕ می‌سازد.

با محدوده فرکانس زاویه‌ای 84.78GHz-96.83GHz با پهناهای باند 22.05GHz را مشاهده کردیم.

علاوه بر این دو گاف باند، گاف باند دیگری در اطراف فرکانس زاویه‌ای 6.01GHz در حال تولد است. هرچند میزان عبور در حوالی این فرکانس نزدیک صفر نیست اما می‌توان آن را تقویت کرد. چون این گاف فقط در بلورهای فوتونی ناهمسان گرد ظاهر می‌شود، برای تمایز از بقیه گاف‌ها آن را باند براگ ناهمسان گرد

همچنین با انجام محاسبات مشابه برای موج مغناطیسی با قطبش TM ماتریس انتقال مشابهی قابل محاسبه است که در آن

$$a_2 = (w/c) \sqrt{e_{B\parallel} e_{B\perp} (\omega m_{B\perp} - \sin^2 \phi / w^2)} \quad (12)$$

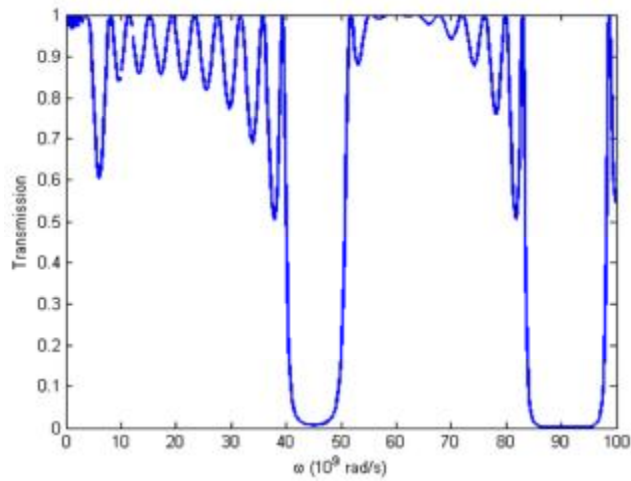
$$a_1 = -\frac{f}{w} k_x$$

و نیز $q_B = wa_2 / (e_{B\parallel} e_{B\perp} w/c)$ است.

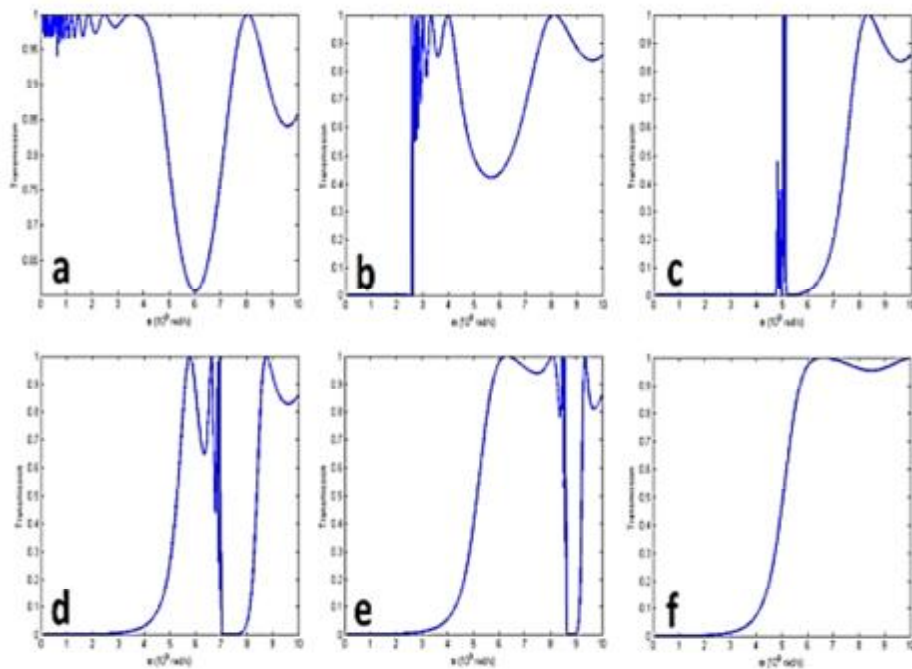
بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک بلور فوتونی یک بعدی با لایه دی الکتریک A و یک لایه ناهمسان گرد B را در نظر گرفتیم (مطابق شکل 1) ضریب گذردهی الکتریکی لایه A ساختار که همسان گرد انتخاب کردیم عبارت است از $\epsilon_A = 2.5$ و ضریب تراوایی آن $\mu_A = 1$ است.

ضخامت لایه A را $d_A = 10\text{mm}$ در نظر می‌گیریم و برای لایه ناهمسان گرد B به ضخامت $d_B = 5\text{mm}$ پارامترهای اپتیکی و هندسی به صورت زیر در نظر می‌گیریم:



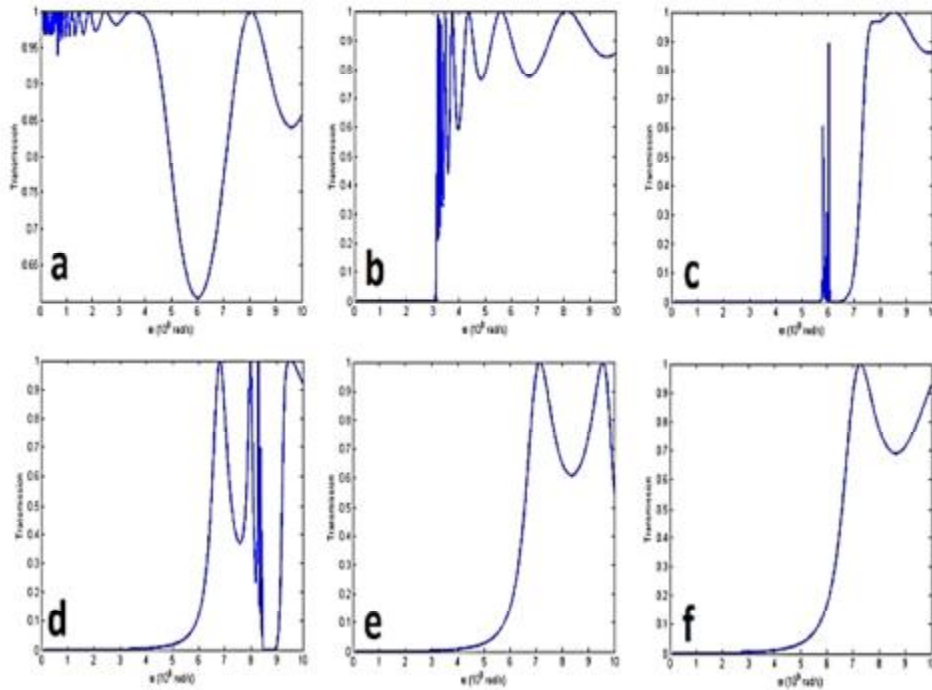
شکل 2. طیف تراگسیل بلور فوتونی ناهمسان گرد در قطبش TE



شکل 3. طیف تراگسیل ساختار بلور فوتونی برای قطبش TE و زوایای φ=0 a) φ=15 b) φ=30 c) φ=45 d) φ=60 e) φ=90 f)

می‌نامیم. جالب آنکه مشابه این نتیجه را برای قطبش TM یافتیم. قابل پیش‌بینی است که خواص نوری بلور فوتونی مورد بحث وابسته به جهت محور نوری مواد ناهمسان گرد خواهد بود. برای نشان دادن این موضوع طیف تراگسیل ساختار برای قطبش TE به ازای زوایای مختلف φ در حالت تابش عمودی در شکل 3 نشان داده شده است. این نمودارها وابستگی گاف باند ناهمسان گرد ساختار بلور فوتونی ناهمسان گرد به زاویه φ را نشان می‌دهد و پهنای و موقعیت گاف باند با افزایش زاویه φ تغییر می‌کند.

می‌نامیم. جالب آنکه مشابه این نتیجه را برای قطبش TM یافتیم. قابل پیش‌بینی است که خواص نوری بلور فوتونی مورد بحث وابسته به جهت محور نوری مواد ناهمسان گرد خواهد بود. برای نشان دادن این موضوع طیف تراگسیل



شکل 4. طیف تراگسیل ساختار بلور فوتونی برای قطبش TM و زوایای c) $\varphi=30$ b) $\varphi=15$ a) $\varphi=0$ d) $\varphi=45$ e) $\varphi=60$ f) $\varphi=90$

برای تابش عمودی در قطبش‌های TE و TM در شکل 5 رسم شده است که نواحی تاریک نشانگر گاف‌ها هستند این شکل نتایج حاصل در شکل 3 و شکل 4 را تایید می‌کند.

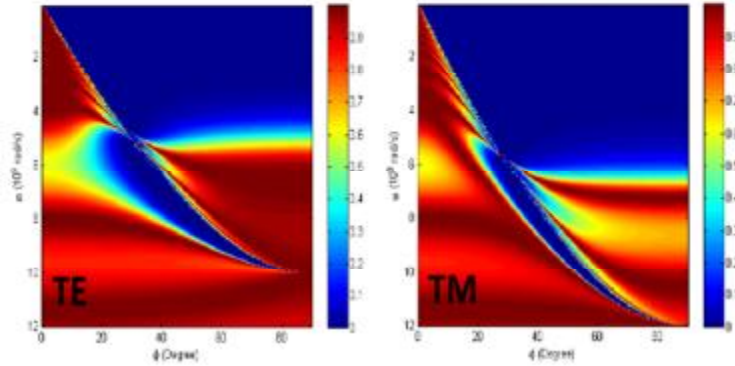
با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در قطبش‌های TE و TM افزایش φ تا نزدیکی $\varphi=30$ در پهنا و موقعیت گاف تأثیر گذاشته و باعث افزایش گاف باند می‌شود. در صورتی که با افزایش بیشتر φ تأثیر قابل توجهی در این گاف ندارد ولی باعث تغییر در گاف دوم می‌شود تا اینکه در قطبش TE در نزدیکی $\varphi=80$ و در قطبش TM در نزدیکی $\varphi=90$ کاملاً از بین می‌رود.

در ادامه برای نشان دادن تأثیر زاویه تابش Θ بر روی گاف‌های بلور فوتونی ناهمسان‌گرد، طیف تراگسیل

با توجه به شکل 3 (a) ساختار در $\varphi=0$ دارای گاف نیست ولی با افزایش φ یک گاف باند در نواحی فرکانس پایین ظاهر می‌شود که با افزایش φ پهنای گاف باند نیز افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش بیشتر φ گاف باند دوم ظاهر می‌شود که پهنا و موقعیت آن هم به φ وابسته است. با توجه به شکل 3 (f) مشاهده می‌کنیم که این گاف زمانی که $\varphi=90$ می‌باشد کاملاً محو است.

طیف تراگسیل ساختار برای قطبش TM نیز به ازای زوایای مختلف φ در تابش عمودی در شکل 4 نشان داده شده است. این نمودارها وابستگی گاف باند فوتونی ساختار بلور فوتونی ناهمسان‌گرد به زاویه φ را نشان می‌دهد و پهنا و موقعیت گاف باند با افزایش زاویه φ تغییر می‌کند.

برای روشن شدن این رفتار سیستم طیف تراگسیل ساختار بلور فوتونی ناهمسان‌گرد در صفحه $(\omega-\varphi)$ و

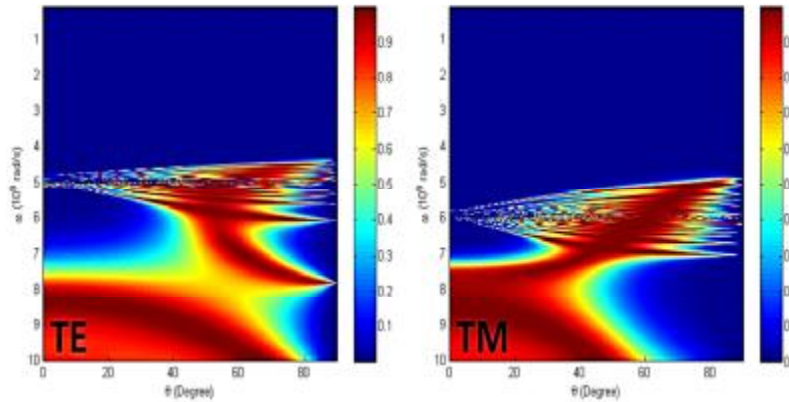


شکل 5. طیف تراگسیل ساختار بلور فوتونی برحسب ω و ϕ برای تابش عمودی

بنابراین به صورت مختصر، در این مقاله ما یک بلور فوتونی یک بعدی شامل یک لایه دی الکتریک و یک لایه ناهمسان گرد در هر تناوب را در نظر گرفتیم. طیف تراگسیل بلور فوتونی ناهمسان گرد را با بهره گیری از روش ماتریس انتقال برای هر دو حالت قطبش TE و TM رسم کردیم و نشان دادیم که در بلور فوتونی ناهمسان گرد علاوه بر دو گاف براگ که در بلور فوتونی همسان گرد وجود داشت باند براگ ناهمسان گرد نیز ظاهر می شود، نشان دادیم که پهنا و موقعیت گاف باند با افزایش زاویه ϕ تغییر می کند به طوری که گاف باند

سیستم را برحسب ω و Θ برای حالت $\phi=30$ در قطبش های TE و TM رسم کرده ایم.

این نتایج علاوه بر اینکه تطابق زیادی با نتایج قبل دارند اطلاعات دیگری هم در مورد خواص سیستم به ما می دهند. با توجه به شکل 6 مشاهده می شود که برای زوایای ϕ غیر صفر گاف باند اول تا حدودی مستقل از زاویه تابش است، درحالی که این موضوع برای گاف دوم صدق نمی کند و گاف دوم در هر دو قطبش TE و TM به ازای زوایای خاصی تقریباً بسته می شود.



شکل 6. تراگسیل بلور فوتونی برحسب ω و Θ در قطبش های TE و TM برای $\phi=30$.

می‌رود. همچنین تأثیر زاویه پرتوی فرودی را در طیف تراگسیل ساختار به ازای ϕ غیر صفر مشاهده کردیم.

ناهمسان‌گرد دوم نیز ظاهر می‌شود که پهنا و موقعیت آن‌هم به ϕ وابسته است و با افزایش زاویه ϕ به ازای زوایای خاصی در هر دو قطبش TE و TM کاملاً از بین

منابع

- [1] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices"; Physical review letters 58 (1987) 2486-2489.
- [2] E. Yablonovitch and T. Gmitter, "Photonic band structure: the face-centered-cubic case"; Physical Review Letters 63 (1989) 1950-1953.
- [3] S. Wang and L. Gao, "Omnidirectional reflection from the one-dimensional photonic crystal containing anisotropic left-handed material," The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems 48 (2005) 29-36.
- [4] P. Yeh, "Optics of anisotropic layered media: a new 4×4 matrix algebra," Surface Science 96 (1980) 41-53.
- [5] E. Yablonovitch, T. Gmitter, "Photonic band structure: the face-centered-cubic case"; Physical Review Letters 63, (1989) 1950-1953.
- [6] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. Winn, "Photonic Crystals Molding the flow of light"; Appendix D, PRINCETON, (1997).
- [7] T. Pan, G. Xu, T. Zang, and L. Gao, "Goos-Hänchen shift in one-dimensional photonic crystals containing uniaxial indefinite medium," physica status solid B 246 (2009) 1088-1093.
- [8] J. R. Reitz, F. J. Milford, and R. W. Christy, "Foundations of electromagnetic theory" Addison-Wesley Publishing Company, (2008)
- [9] Z. Zhang and S. Satpathy, "Electromagnetic wave propagation in periodic structures: Bloch wave solution of Maxwell's equations"; Physical review letters 65, (1990) 2650-2653
- [10] N.-h. Liu, S.-Y. Zhu, H. Chen, and X. Wu, "Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect," Physical Review E 65 (2002) 046607.