بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۴۶۱-۱۰-A

بررسی طیف عبوری بلورهای فوتونی یک بعدی فیبوناچی مرتبه سوم شامل شبه فلز دیراک

زهره مومیوند ، بهروز رضائی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

چکیده - در این مقاله طیف عبوری بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم حاوی شبه فلز دیراک برای قطبش الکتریکی با استفاده از روش ماتریس انتقال در ناحیه فرکانسی تراهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که گافهای نواری فوتونی می توانند با تغییر انرژی فرمی شبه فلز دیراک تنظیم شوند. بعلاوه، اثر زاویه تابش بر روی گافهای فوتونی بررسی گردید. نتایج محاسبات نشان می دهد که انرژی فرمی تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی تغییر گافهای فوتونی دارد، اما اثر زاویه تابش ناچیز است.

کلید واژه- بلور فوتونی، گاف نواری فوتونی، طیف عبوری، شبه فلز دیراک.

Investigation of the transmission spectrum of third-order one-dimensional Fibonacci photonic crystals containing Dirac semimetal

ZohrehMoomivand, and BehroozRezaei

Faculty of Physics, University of Tabriz

Abstract- In this paper, the transmission spectrum of the third-order one-dimensional photonic crystalscontaining Dirac semimetal has been investigated for electric polarizationin terahertz frequency region, using the transfer matrix method. It has been demonstrated that the photonic band gaps can be tuned by varying the Fermi energy of the Dirac semimetal. In addition, the effect of incident angle on photonic band gapswas investigated. The numerical results show that the Fermi energy have considerable effect on modification of photonic band gaps, but the incident angle have negligible effect.

Keywords: Photonic crystal, photonic band gap, transmission spectrum, Dirac semimetal.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

مقدمه

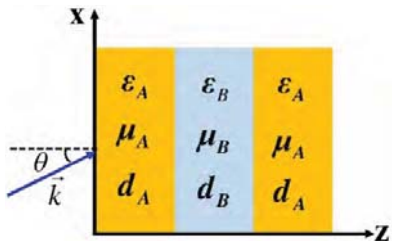
بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب مصنوعی هستند که از دو یا چند ماده با ضریب دی الکتریک مختلف ساخته شده اند [۱]. مهم ترین خاصیت این ساختارها وجود ناحیه ممنوعه فرکانسی (گاف نواری فوتونی) در طیف عبوری آنها می باشد که ناشی از تناوب سیستم و پراکندگی براگ است، بطوریکه امواج الکترومغناطیس در این ناحیه فرکانسی قادر به انتشار نیستند. این خاصیت منجر به پدیده های غیرمعمول فیزیکی مانند جایگزیدگی نور می شود [۲]. در سالهای اخیر بلورهای فوتونی بدلیل دارا بودن خواص نوری فوق العاده، توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. کاربردهای گوناگونی از بلورهای فوتونی مانند لیزرهای نیمرسانا با بهره بالا [۳]، موجبرها [۴] و فیبرهای نوری [۵] ارائه شده است. بلورهای فوتونی قابل تنظیم از اهمیت ویژه ای در سیستم های ارتباطات نوری برخوردار هستند و در حال حاضر توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. برای این منظور از موادی مانند بلور مایع [۶]، گرافن [۷] و غیره استفاده می کنند.

اخیراً حالت جدیدی از ماده کوانتومی بنام شبه فلز دیراک کشف شده است. این مواد در فرکانس های پایین تر از انرژی فرمی رفتار فلزی از خود نشان می دهند، در حالیکه در فرکانسهای بالاتر از آن شبیه دی الکتریک عمل می کنند. تابع دی الکتریک شبه فلز دیراک به صورت تابعی از فرکانس، دما و انرژی فرمی است و می توان آن را با تغییر انرژی فرمی از طریق اعمال ولتاژ گیت خارجی، بطور دینامیکی کنترل نمود [۸].

در این مقاله تنظیم پذیری طیف عبوریبلور فوتونی یک بعدی فیبوناچی مرتبه سوم حاوی شبه فلز دیراک را در محدوده فرکانسی تراهرتز برای قطبش الکتریکی با استفاده از روش ماتریس انتقال مورد مطالعه قرار می دهیم. نتایج محاسبات نشان می دهد که پهنا و موقعیت گافهای نواری فوتونی بطور قابل ملاحظه ای با تغییر انرژی فرمی شبه فلز دیراک کنترل می شوند. همچنین اثر زاویه تابش را بر روی گافهای فوتونی و طیف عبوری ساختار مورد نظر بررسی می کنیم.

روش محاسبات

ساختار مورد مطالعه در این مقاله بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم است که سلول اولیه آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سلول اولیه بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم شامل لایه دی الکتریک SiO_2 و شبه فلز دیراک

پارامترهای فیزیکی لایه های A و B ، یعنی ثابت دی الکتریک، ضخامت و تراوایی مغناطیسی، به ترتیب عبارتند از: $(\varepsilon_A, d_A, \mu_A)$ و $(\varepsilon_B, d_B, \mu_B)$. سلول اولیه هر ساختار فیبوناچی مرتبه n ام، F_n، توسط رابطه $F_{n+1} = [F_n, F_{n-1}]$ با $F_0 = [B]$ و $F_1 = [A]$ مشخص می شود. بنابراین سلول اولیه ساختار شبه تناوبی فیبوناچی مرتبه سوم بصورت $F_3 = [ABA]$ خواهد بود. لایه A از جنس دی الکتریک معمولی و لایه B شبه فلز دیراک است و تابع دی الکتریک آن بصورت زیر تعریف می شود [۹]:

$$\varepsilon_B(\omega) = \varepsilon_b + i\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \quad (۱)$$

که ε_b ثابت دی الکتریک موثر زمینه ، ε_0 گذردهی خلا و σ رسانندگی نوری شبه فلز دیراک بوده و قسمتهای حقیقی و موهومی آن در حد دماهای پایین $T \ll E_F$ بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} \mathrm{Re}\,\sigma(\Omega) &= \frac{e^2}{\hbar}\frac{gk_F}{24\pi}\Omega\theta(\Omega-2) \\ \mathrm{Im}\,\sigma(\omega) &= \frac{e^2}{\hbar}\frac{gk_F}{24\pi^2}\left[\frac{4}{\Omega} + \Omega\ln\left(\frac{4\varepsilon_c^2}{|\Omega^2-4|}\right)\right] \end{aligned} \quad (۲)$$

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

در رابطه فوق $\Omega = \hbar\omega / E_F$ ، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت کاهش یافته پلانک، g ضریب تبهگنی، E_F انرژی فرمی، $k_F = E_F / \hbar v_F$ ممانتوم فرمی و v_F سرعت فرمی و ε_c انرژی قطع می باشد. برای محاسبه طیف عبوری ساختار مورد مطالعه از روش ماتریس انتقال مبتنی بر ماتریس انتشار و ماتریس دینامیکی استفاده می کنیم [۱۰]. ماتریس انتشاردر هر لایه بصورت زیر است:

$$P_l = \begin{bmatrix} \exp(-ik_{l,z}d_l) & 0 \\ 0 & \exp(ik_{l,z}d_l) \end{bmatrix}, (l = 1,2,\cdots) \quad (۳)$$

و ماتریس دینامیکی در گذار از یک محیط به محیط دیگر بصورت زیر تعریف می شود:

$$D_{l,l+1} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1+\eta_l & 1-\eta_l \\ 1-\eta_l & 1+\eta_l \end{bmatrix} \quad (۴)$$

در روابط فوق $k_{l,z} = (\omega / c)\sqrt{\varepsilon_l \mu_l - \sin^2\theta}$ ، ω فرکانس زاویه ای، c سرعت نور در خلاء و برای قطبش الکتریکی (میدان الکتریکی در راستای محور y) $\eta_l = k_{l+1,z} / k_{l,z}$ است. ماتریس انتقال کل سیستم با رابطه زیر داده می شود:

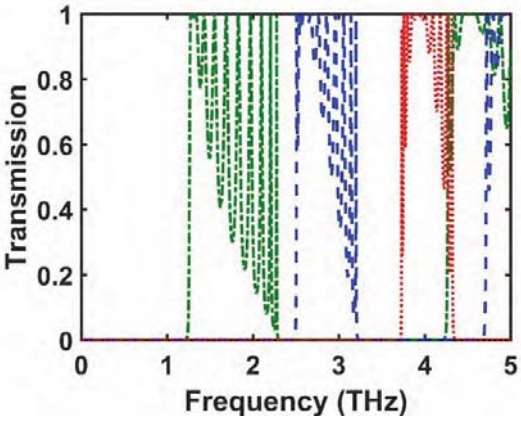
$$M = D_{0,1}P_1D_{1,2}\cdots P_N D_{N,sub} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

در این رابطه N تعداد لایه های ساختار را نشان می دهد. با استفاده از ماتریس انتقال می توان طیف عبوری کل سیستم را بصورت زیر محاسبه کرد:

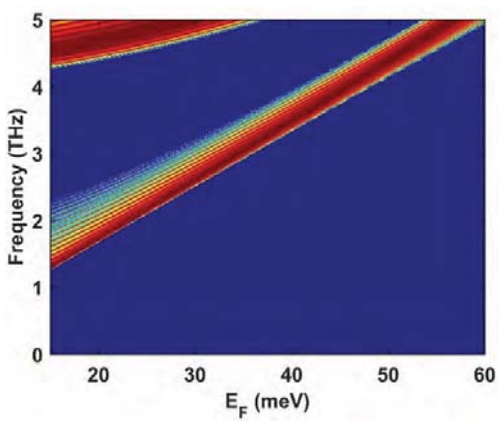
$$T = \left|\frac{1}{m_{11}}\right|^2 \quad (۶)$$

نتایج و بحث

در این بخش نتایج محاسبات عددی طیف عبوری برای قطبش الکتریکی با در نظر گرفتن پارامترهای $\varepsilon_A = 2.25$ ، $\mu_A = 1$ ، $d_A = 5\mu m$ ، $\mu_B = 3$ ، $d_B = 5\mu m$ ، $\varepsilon_b = 13$ ، $g = 4$ ، $v_F = 10^6 m/s$ و $\varepsilon_c = 3$ گزارش شده است[۱۱]. طیف عبوری ساختار مورد مطالعه در محدوده فرکانسی ۰-۵ تراهرتز برای $N = 30$ بازای مقادیر مختلف انرژی فرمی $E_F = 15,30,45 meV$ تحت تابش عمودی $\theta = 0$، محاسبه شده و در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲:طیف تراگسیلی بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم برای قطبش الکتریکی بازای انرژیهای فرمی $15 meV$ (رنگ سبز)، $30 meV$ (رنگ آبی) و $45 meV$ (رنگ قرمز) تحت تابش عمودی.

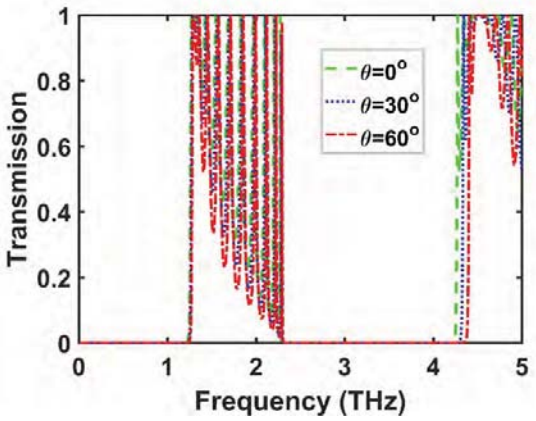


شکل ۳:طیف عبوری بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم برای قطبش الکتریکی بر حسب تابعی از انرژی فرمی و فرکانس تحت تابش عمودی.

مشاهده می شود که با افزایش انرژی فرمی پهنای گاف فوتونی اول که ناشی از منفی بودن ثابت دی الکتریک شبه فلز دیراک در فرکانسهای پائین در سیستم است، افزایش می یابد و لبه پائین و بالای گاف فوتونی دوم بطرف فرکانسهای بالا جابجا می شود. شکل ۳ بررسی جامعی از طیف عبوری سیستم را برای تابش عمودی بصورت تابعی از فرکانس و انرژی فرمی نشان می دهد. ملاحظه می شود

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

که با افزایش انرژی فرمی پهنای گاف فوتونی اول افزایش می یابد و حساسیت آن نسبت به تغییرات انرژی فرمی بیشتر است. همچنین ضمن اینکه لبه پائین و بالای گاف فوتونی دوم به طرف فرکانسهای بالا جابجا می شود، پهنای آن با افزایش انرژی فرمی کاهش می یابد. در پایان اثر زاویه تابش در مقدار ثابت انرژی فرمی $E_F = 15meV$ بر روی گافهای فوتونی نیز بررسی شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. طیف عبوری ساختار بازای زوایای تابش $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ محاسبه شده است و مشاهده می شود که با افزایش زاویه تابش، گاف فوتونی اول بدون تغییر و لبه بالایی گاف فوتونی دوم به اندازه کمی به طرف فرکانسهای بالا جابجا می شود و در حالت کلی اثر آن بر روی طیف عبوری سیستم ناچیز است.



شکل ۴:طیف عبوری بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی مرتبه سوم برای قطبش الکتریکی بازای $E_F = 15meV$ برای زوایای تابش $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تنظیم پذیری طیف عبوری بلور فوتونی فیبوناچی یک بعدی با تغییرات انرژی فرمی شبه فلز دیراک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان داد که انرژی فرمی در تنظیم پذیری پهنا و موقعیت فرکانسی گافهای نواری فوتونی تاثیر قابل ملاحظه ای دارد. تاثیر زاویه فرودی نیز بر روی گافهای نواری فوتونی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که این اثرات ناچیز است.

مرجع‌ها

[1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals: Molding the flow of light, Princeton University Press, 2nd ed., Princeton, 2008M. Lundstrom, Fundamentals of Carrier Transport, p. 44, Cambridge University Press, 2000.

[2] S. John, “Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices” Phys. Rev. Lett. Vol. 58, pp. 2486, 1987.

[3] M. Loncar, T. Yoshie, A. Scherer, P. Gogna and Y. Qiu, “Low-threshold photonic crystal laser”, Appl. Phys. Lett. Vol. 81, pp. 2680, 2002.

[4] S. G. Johnson, P.R. Villeneuve, S. Fan and J. D. Joannopoulos, “Linear waveguides in photonic-crystal slabs”, Phys. Rev. B Vol. 62, pp. 8212, 2000.

[5] P. St. J. Russell, “Photonic crystal fibers”, Science Vol. 299, pp. 358, 2003.

[6] B. Rezaei, I. H. Giden, and H. Kurt, “Tuning Light Focusing with Liquid Crystal Infiltrated Graded Index Photonic Crystals”, Opt. Commun. Vol. 382, pp. 28, 2017.

[7] H. Mahmoodzadeh, B. Rezaei, “Tunable Bragg defect mode in one-dimensional photonic crystal containing graphene-embede defect layer”, Appl. Optics Vol. 57, pp. 2172, 2018.

[8] L. X. Wang, C. Z. Li, D. P. Yu, and Z. M. Liao, “Aharonov-Bohm oscillations in Dirac semimetal Cd_3As_2 nanowires”, Nat. Commun. Vol. 7, pp. 10769, 2016.

[9] G. D. Liu, X. Zhai, H. Y. Meng, Q. Lin, Y. Huang, C. J. Zhao, and L. L. Wang, “Dirac semimetals based tunable narrowband absorber at terahertz frequencies”, Opt. Express Vol. 26, pp. 11471, 2018.

[10] X.-H. Deng, J.-T. Liu, J.-R. Yuan, Q.-H. Liao and N.-H. Liu, “A new transfer matrix method to calculate the optical absorption of graphene at any position in stratified media”, EPL Vol. 109, pp. 27002, 2015.

[11] Y. Zhao, Y. Zhang, X. Guo, M. Liu, H. Chen, S. Liu, and H. Zhang, “Tunable omnidirectional photonic band gap of one-dimensional photonic crystals containing Dirac semimetals”, J. Appl. Phys. Vol. 122, pp. 223108, 2017.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.