



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 : ۱-۲۴۶۰-۱۰-A

حالت‌های سطحی تنظیم پذیر در بلورهای فوتونی یک بعدی شامل لایه پوششی شبه فلز دیراک

پریسا فرهادی، بهروز رضائی، جواد بشیری، علی سلطانی والا

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

چکیده - در این مقاله حالت‌های سطحی یک بلور فوتونی یک بعدی نیمه بی نهایت در حضور لایه پوششی شبه فلز دیراک با استفاده از روش تحلیلی تطابق مستقیم در مدل کرونیگ-پنی در ناحیه فرکانسی تراهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. نشان می دهیم که حالت‌های سطحی با قطبش الکتریکی می تواند با تغییر انرژی فرمی شبه فلز دیراک، که نقش اصلی را در کنترل و جایگزیدگی این حالت‌های سطحی بازی می کند، تنظیم شود. بعلاوه، اثر ضخامت لایه پوششی روی حالت‌های سطحی بررسی شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که انرژی فرمی و ضخامت لایه پوششی تاثیر قابل ملاحظه ای روی تغییر حالت‌های سطحی دارد.

کلید واژه- باند ممنوعه فوتونی، بلور فوتونی، حالت‌های سطحی، شبه فلز دیراک.

Tunable surface states in one-dimensional photonic crystals containing Dirac semimetal cap layer

Parisa Farhadi, Behrooz Rezaei, Javad Bashiri, Ali Soltani Vala

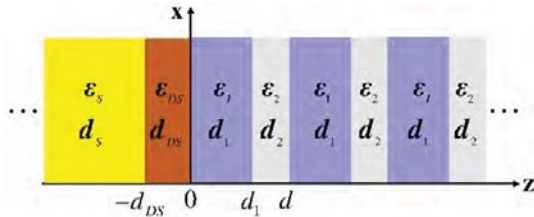
Faculty of Physics, University of Tabriz

Abstract- In this paper, the surface states in a semi-infinite one-dimensional photonic crystal in the presence of Dirac semimetal cap layer has been investigated in terahertz frequency region, using the analytical direct matching procedure within the Kronig-Penny model. We demonstrate that the TE-polarized surface states can be tuned by varying the Fermi energy of Dirac semimetal, which plays an important role in controlling and localization of these surface states. In addition, the effect of the thickness of cap layer on surface states has been investigated. The numerical results show that the Fermi energy and thickness of cap layer have considerable effect on modification of surface states.

Keywords: Photonic band gap, photonic crystal, surface states, Dirac semimetal.

روش محاسبات

ساختار مورد مطالعه در این تحقیق بصورت طرحوار در شکل ۱ نشان داده شده است که در آن تناوب بلور فوتونی در جهت Z می باشد.



شکل ۱. ساختار بلور فوتونیک بعدی با یک لایه پوششی شبه فلز دیراک میدان الکتریکی برای قطبش TE در جهت محور Y خواهد بود و سلول واحد بلور فوتونی شامل دو لایه با ضریب دی الکتریک ϵ_i و تراوایی مغناطیسی μ_i ($i = 1, 2$) می باشد. ساختار باند تصویر یافته بلور فوتونی از رابطه زیر حاصل می شود [۳]:

$$\cos(k_B d) = \cosh(k_{1z} d_1) \cosh(k_{2z} d_2) + \frac{1}{2} \left(\frac{F_1}{F_2} + \frac{F_2}{F_1} \right) \sinh(k_{1z} d_1) \sinh(k_{2z} d_2) \quad (1)$$

که در آن $F_i = k_{iz} / \mu_i$ و $k_{iz} = \sqrt{k_{\parallel}^2 - \epsilon_i \mu_i \omega^2 / c^2}$ بردار موج بلوخ، ω فرکانس زاویه ای، c سرعت نور و k_{\parallel} مولفه موازی بردار موج است. با اعمال شرایط مرزی بر روی مولفه های مماسی میدان الکتریکی و مغناطیسی در نقاط $z = -d_{DS}$ و $z = 0$ می توان رابطه پاشندگی حالت های سطحی را بدست آورد:

$$\frac{F_1 F_s}{F_{DS} \gamma} \sinh(k_{DS} d_{DS}) - F_s \cosh(k_{DS} d_{DS}) - F_{DS} \cosh(k_{DS} d_{DS}) + \frac{F_1}{\gamma} \cosh(k_{DS} d_{DS}) = 0 \quad (2)$$

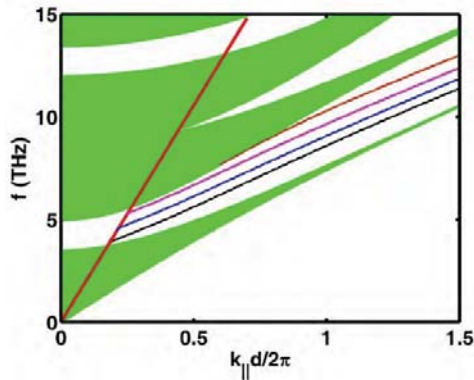
در رابطه فوق $F_s = k_s / \mu_s$ ، $k_s = \sqrt{k_{\parallel}^2 - \epsilon_s \mu_s \omega^2 / c^2}$ ، $F_{DS} = k_{DS} / \mu_{DS}$ ، $k_{DS} = \sqrt{k_{\parallel}^2 - \epsilon_{DS} \mu_{DS} \omega^2 / c^2}$ می باشد و γ بصورت زیر تعریف می شود:

مقدمه

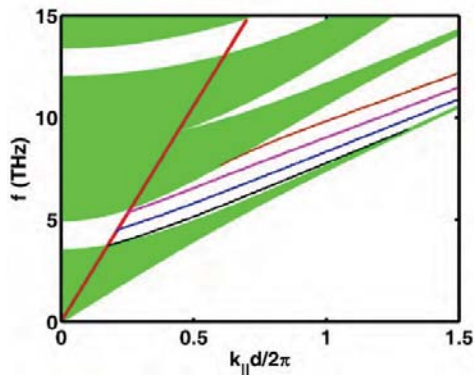
بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب از مواد با ضرایب شکست مختلف هستند که یکی از ویژگیهای اساسی آنها وجود باند ممنوعه فرکانسی در ساختار باند فوتونی آنها می باشد، بطوریکه امواج در این ناحیه فرکانسی اجازه انتشار را ندارند [۱]. ایجاد نقص در بلورهای فوتونی منجر به ایجاد مدهای جایگزیده در ناحیه باند ممنوعه آنها می شود. به همین ترتیب زمانی که یک بلور فوتونی بی نهایت قطع می شود، حالت های سطحی جایگزیده می توانند در سطح مشترک بلور فوتونی و یک محیط همگن ایجاد شوند، بطوریکه این امواج هنگام دور شدن از سطح مشترک در راستای عمود بر آن بصورت نمایی در هر دو محیط بلور فوتونی و محیط همگن میرا می شوند [۱].

در این مقاله امواج سطحی ایجاد شده در فصل مشترک بلور فوتونی یک بعدی و محیط همگن هوا در حضور لایه پوششی شبه فلز دیراک بصورت نظری مورد مطالعه قرار گرفته است. شبه فلز دیراک دارای منحنی پاشندگی خطی در فضای ممانتوم سه بعدی است و الکترونیهای کبه ای آن تشکیل ساختار مخروطی سه بعدی می دهند. بنابراین، می توان شبه فلز دیراک را بعنوان گرافن سه بعدی در نظر گرفت. 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 از طریق تغییر انرژی فرمی بوسیله ولتاژ گیت بطور دینامیکی کنترل نمود [۲]. در این تحقیق تنظیم پذیری حالت های سطحی در محدوده فرکانسی تراهرتز برای قطبش TE با استفاده از روش تحلیلی تطابق مستقیم در مدل کرونیگ-پنی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج محاسبات نشان می دهد که موقعیت و جایگزیدگی حالت های سطحی بطور قابل ملاحظه ای با تغییر انرژی فرمی کنترل می شوند. تاثیر ضخامت لایه پوششی روی حالت های سطحی نیز گزارش شده است.

یافته بلور فوتونی یک بعدی (ناحیه سبزرنگ) به همراه منحنی پاشندگی حالت‌های سطحی در داخل گاف فوتونی را نشان می‌دهد که بازای ضخامت لایه پوششی d_{DS} برای مقادیر مختلف انرژی فرمی لایه پوششی $E_F = 30, 45, 60, 75 \text{ meV}$ محاسبه شده است.



شکل ۲: حالت‌های سطحی ایجاد شده در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط همگن در حضور لایه پوششی شبه فلز دیراک برای ضخامت لایه پوششی $d_{DS} = 3 \mu\text{m}$ به ازای $E_F = 30 \text{ meV}$ (رنگسبزه)، $E_F = 45 \text{ meV}$ (رنگ آبی)، $E_F = 60 \text{ meV}$ (رنگ صورتی) و $E_F = 75 \text{ meV}$ (رنگ قهوه‌ای). خط مستقیم قرمز رنگ خط نوری و ناحیه سبز رنگ ساختار باند تصویر یافته است.



شکل ۳: حالت‌های سطحی ایجاد شده در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط همگن در حضور لایه پوششی شبه فلز دیراک برای ضخامت لایه پوششی $d_{DS} = 5 \mu\text{m}$ به ازای $E_F = 30 \text{ meV}$ (رنگ سیاه)، $E_F = 45 \text{ meV}$ (رنگ آبی)، $E_F = 60 \text{ meV}$ (رنگ صورتی) و $E_F = 75 \text{ meV}$ (رنگ قهوه‌ای).

ملاحظه می‌شود که حالت‌های سطحی ایجاد شده نسبت به تغییرات انرژی فرمی حساس هستند و جابجایی قابل ملاحظه

$$\gamma = A / B$$

$$A = \sinh(k_{1z}d_1) + F_1 S / F_2 \sinh(k_{2z}d_2) \quad (3)$$

$$B = S \cosh(k_{2z}d_2) - \cosh(k_{1z}d_1)$$

که در آن $S = e^{ik_B d}$ و $d = d_1 + d_2$ ثابت شبکه بلور فوتونی است. تابع دی الکتریک لایه ی پوششی شبه فلز دیراک بصورت زیر بیان می‌شود [۴]:

$$\epsilon_{DS}(\omega) = \epsilon_b + i \frac{\sigma_{DS}}{\omega \epsilon_0} \quad (4)$$

که ϵ_b ثابت دی الکتریک موثر زمینه، ϵ_0 گذردهی خلا و σ_{DS} رسانندگی نوری شبه فلز دیراک بوده و قسمت‌های حقیقی و موهومی آن در حد دماهای پایین $E_F \ll T$ بصورت زیر است [۴]:

$$\text{Re} \sigma_{DS}(\Omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{g k_F}{24\pi} \Omega \theta(\Omega - 2) \quad (5)$$

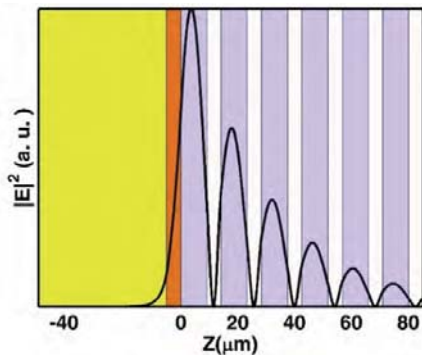
$$\text{Im} \sigma_{DS}(\omega) = \frac{e^2}{\hbar} \frac{g k_F}{24\pi^2} \left[\frac{4}{\Omega} + \Omega \ln \left(\frac{4\epsilon_c^2}{|\Omega^2 - 4|} \right) \right]$$

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 فرمی قطع می‌باشد.

نتایج و بحث

در این بخش نتایج محاسبات عددی برای قطبش TE با در نظر گرفتن پارامترهای $\epsilon_1 = 3.9 (\text{SiO}_2)$ ، $\epsilon_2 = 11.9 (\text{Si})$ ، $d_1 = 9.2 \mu\text{m}$ ، $d_2 = 5 \mu\text{m}$ [۵]، برای بلور فوتونی و $\epsilon_b = 13$ ، $g = 4$ ، $v_F = 10^6 \text{ m/s}$ و $\epsilon_c = 3$ برای لایه پوششی شبه فلز دیراک [۶] و برای محیط همگن هوا گزارش شده است. حالت‌های سطحی در محدوده فرکانسی ۰-۱۵ تراهرتز بازای مقادیر مختلف انرژی فرمی E_F و ضخامت لایه پوششی d_{DS} محاسبه شده است. شکل ۲ ساختار باند تصویر

فرمی لایه پوششی شبه فلز دیراک از طریق ولتاژ گیت اعمالی، می‌توان مدهای سطحی را بطور دینامیکی کنترل نمود. تاثیر ضخامت لایه پوششی نیز بر روی حالت‌های سطحی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بدست آمده نشان داد که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی حالت‌های سطحی دارد.

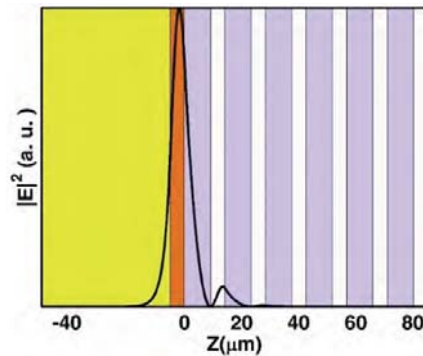


شکل ۵: پروفایل میدان الکتریکی مد سطحی پروفایل میدان الکتریکی مد سطحی و $E_F = 75meV$ بازای $k_{\square}d / 2\pi = 0.6$ و $d_{DS} = 5\mu m$.

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, 2008.
- [2] 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.
- [3] H. Hajian, B. Rezaei, A. Soltani Vala and M. Kalafi, "Tuned switching of surface waves by a liquid crystal cap layer in one-dimensional photonic crystals", Applied Optics Vol. 51, pp. 2909, 2012.
- [4] 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.
- [5] N. M. R. Peres and Yu. V. Bludov, "Enhancing the absorption of graphene in the terahertz range", EPL Vol. 101, pp. 58002, 2013.
- [6] 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.

ای را از نظر موقعیت فرکانسی از خود نشان می‌دهند. همچنین برای بررسی تاثیر ضخامت لایه پوششی این محاسبات را برای ضخامت $d_{DS} = 5\mu m$ تکرار می‌کنیم. نتایج محاسبات در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت لایه پوششی تاثیر زیادی در تغییر بازه فرکانسی مدهای سطحی دارد و نیز همانند شکل ۲ موقعیت فرکانسی مدهای سطحی می‌تواند با تغییر انرژی فرمی قابل تنظیم باشد. در پایان میزان جایگزیدگی حالت‌های سطحی را بر حسب تغییر انرژی فرمی نشان می‌دهیم. شکل‌های ۴ و ۵ پروفایل میدان الکتریکی مربوط به دو مد سطحی متناظر با دو مقدار متفاوت $E_F = 75meV$ و $E_F = 45meV$ بازای $k_{\square}d / 2\pi = 0.6$ و ضخامت لایه $d_{DS} = 5\mu m$ پوششی را در راستای محور Z نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که مد سطحی برای انرژی فرمی ۴۵ میلی‌الکترون‌ولت جایگزیده‌تر است و در توافق با نتایج ارائه شده در شکل ۳ می‌باشد، چون مد سطحی واقع در داخل گاف نواری نسبت به مد سطحی نزدیک به لبه نوار جایگزیده‌تر است.



شکل ۴: پروفایل میدان الکتریکی مد سطحی پروفایل میدان الکتریکی مد سطحی و $E_F = 45meV$ بازای $k_{\square}d / 2\pi = 0.6$ و $d_{DS} = 5\mu m$.

نتیجه‌گیری

در این مقاله تنظیم پذیری پاشندگی مدهای سطحی در ساختار مورد مطالعه با تغییرات انرژی فرمی لایه پوششی شبه فلز دیراک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان داد که اثر انرژی فرمی در تنظیم پذیری و جایگزیدگی حالت‌های سطحی بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین با تغییر انرژی