

دوپایداری نوری در بلورهای فوتونی یک بعدی دارای تک لایه‌ی گرافن

عباس قاسم پور اردکانی، فاطمه بهمنی فیروزی

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، میدان ارم، شیراز

چکیده - در این مقاله، یک ساختار دوپایدار نوری بر پایه‌ی تک لایه‌ی گرافن، دو بلور فوتونی یک بعدی و دو لایه‌ی نقص پیشنهاد می‌شود. نتایج ما نشان می‌دهد که این ساختار می‌تواند به عنوان یک تراشه‌ی دوپایدار در محدوده‌ی فرکانس‌های تراهرتز عمل کند. بستگی آستانه‌ی دوپایداری به تعداد سلول‌ها در بلور فوتونی مطالعه می‌شود. با افزایش تعداد سلول‌ها، آستانه‌ی دوپایداری بالا و پایین ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. سپس، نشان می‌دهیم که با افزایش زاویه‌ی فرودی، مقدار آستانه‌ی بالا به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نهایت نشان داده می‌شود که مقادیر آستانه‌ی بالا و پایین با کاهش انرژی فرمی کاهش می‌یابد. بنابراین آستانه‌ی دوپایداری نوری در این ساختار به راحتی قابل کنترل است.

کلیدواژه- دوپایداری نوری، تک لایه‌ی گرافن، بلور فوتونی و آستانه‌ی دوپایداری.

Optical bistability in one-dimensional photonic crystals containing a single graphene layer

Abbas Ghasempour Ardakani, Fatemeh Bahmani Firoozi

Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71454

Abstract- In this paper, a bistable structure is proposed based on a single graphene layer, two one-dimensional photonic crystals and two defect layers. Our results show that this structure can act as a bistable device in the terahertz regime. The dependence of bistability threshold on the number of unit cells in the photonic crystal is studied. By increasing the number of cells, both switch-down and switch-up thresholds first decrease and then increase. Then we show that the value of switch-up threshold significantly increases with increasing incident angle. Finally, it is demonstrated that both switch-up and switch-down thresholds decrease with decrease of Fermi energy of graphene layer. Therefore, the bistability threshold in this structure is easily controllable.

Keywords: :Optical bistability, Single Graphene layer, Photonic crystal, Bistability threshold.

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

۱- مقدمه

در این مقاله، دوپایداری نوری در بلورهای فوتونی یک بعدی دارای تک لایه‌ی گرافن را بررسی می‌کنیم و نشان می‌دهیم که آستانه‌ی دوپایداری نوری به پارامترهای بلور فوتونی، زاویه‌ی فرودی و انرژی فرمی گرافن بستگی دارد. بنابراین با تغییرات ولتاژ گیت می‌توان آستانه‌ی دوپایداری نوری در گرافن را با یک عامل خارجی کنترل کرد.

۲- روش تئوری

شکل ۱ تراشه‌ی دو پایدار پیشنهاد شده در اینجا را نشان می‌دهد که شامل یک لایه گرافن است که بین دو بلور فوتونی قرار دارد. لایه‌های A و B به ترتیب نشان دهنده‌ی محیط‌هایی با ضریب شکست n_A, n_B و ضخامت‌های $d_A = \frac{d_1}{4n_A}$ و $d_B = \frac{d_1}{4n_B}$ هستند. دو لایه‌ی D به عنوان لایه‌های نقص می‌باشند که دارای ضریب شکست n_D هستند. لایه‌ی گرافن با ضریب شکست n_g و ضخامت d_g بین دو لایه نقص D قرار دارد. در غیاب میدان مغناطیسی خارجی و تقریب فاز کاتوره‌ای، رسانندگی خطی همسانگرد گرافن σ_0 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_0 = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}} \quad (1)$$

در این رابطه σ_{intra} و σ_{inter} به ترتیب رسانندگی درون نوری و بین نوری هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند [۴]:

$$\sigma_{\text{intra}} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i/\tau)} \left[\frac{E_F}{k_B T} + 2 \text{Ln} \left(e^{\frac{E_F}{k_B T}} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}} = \frac{ie^2}{4\pi \hbar} \ln \left| \frac{2E_F - (\omega + i\tau^{-1})\hbar}{2E_F + (\omega + i\tau^{-1})\hbar} \right| \quad (3)$$

که ω بسامد نور فرودی، E_F انرژی فرمی، τ زمان واهلش و T دما بر حسب کلوین است. e ، \hbar و k_B ثابت-های جهانی مربوط به بار الکترون، ثابت پلانک کاهش یافته و ثابت بولتزمن هستند. انرژی فرمی $E_F = \hbar v_F (\pi n_{2D})^{1/2}$ به طور الکترونیکی توسط ولتاژ گیت اعمال شده قابل کنترل است که $v_F = 10^6 \text{ m/s}$ و n_{2D} به ترتیب سرعت فرمی و چگالی عددی الکترون‌ها است.

ضریب رسانندگی غیرخطی σ_3 برای گرافن برابر است با:

$$\sigma_3 = -i \frac{3}{32} \frac{e^2}{\pi \hbar^2} \frac{(e v_F)^2}{E_F \omega^3} (1 + i\alpha_T) \quad (4)$$

که α_T ضریب جذب دوفوتونی در گرافن است و لازم نیست که آن را به حساب آوریم. از این رو $\alpha_T = 0$ [۵].

کنترل نور با استفاده از نور یکی از مهمترین و جالبترین موضوعات تحقیقی در کوانتوم و اپتیک غیر خطی است. سیستم‌های نوری خاصی، برای یک حالت ورودی معین، می‌توانند بیش از یک حالت خروجی داشته باشند. عبارت دوپایداری نوری اشاره به وضعیتی دارد که در آن دو شدت خروجی متفاوت برای یک شدت ورودی معین ممکن می‌شود و عبارت عمومی‌تر چندپایداری نوری برای توصیف وضعیتی به کار می‌رود که در آن دو یا چند حالت خروجی پایدار ممکن می‌شود. توجه و گرایش به دو-پایداری نوری از کاربردهای زیاد این پدیده در ذخیره-سازی نوری، مدارهای منطقی نوری و همچنین از مزیت بالقوه‌ی آن بعنوان سوئیچی برای استفاده در ارتباطات و محاسبات نوری ناشی می‌شود [۱]. در محیط‌های غیر خطی، دوپایداری نوری دیده می‌شود. اما برای کاهش آستانه‌ی شدت لازم برای دوپایداری، معمولاً ماده غیر خطی در یک کاواک فابری-پرو، بین دو بلور فوتونی یا در محل لایه‌های نقص بلورهای فوتونی قرار داده می‌شود. در این مقاله از گرافن به عنوان محیط غیرخطی استفاده شده است. گرافن به دلیل ویژگی‌های فیزیکی فوق العاده‌اش و همچنین به خاطر کاربردهای بالقوه‌ای که در ابزارهای نانو الکترونیکی و ابزارهای نوری الکترونیکی از خود نشان داده است، توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است. این ماده به علت داشتن خواص فوق العاده در رسانندگی الکترونیکی و رسانندگی گرمایی، چگالی بالا و تحریک‌پذیری حامل‌های بار، رسانندگی اپتیکی و خواص مکانیکی به ماده‌ای منحصر به فرد تبدیل شده است [۲].

بعضی از ساختارهای نامتجانس دی الکترونیک-گرافن برای دستکاری تابش‌های تراهرتزی پیشنهاد شده است. همچنین با استفاده از کوک‌پذیری الکترونیکی گرافن، می‌توان حسگرهای اپتیکی قابل کنترل، فرا ماده‌ها، جذب کننده‌ی تراهرتزی و اثر گوس-هانچن ایجاد کرد. به علاوه می‌توان با تغییر ولتاژ اعمال شده به گرافن دوپایداری نوری را کنترل کرد. مطالعات اخیر نشان داده است که گرافن و نانو مواد مرتبط با آن دارای خواص اپتیکی غیر خطی قوی مرتبه‌ی سوم می‌باشد [۳]. بنابراین این ماده برای مشاهده‌ی اثر کر مناسب می‌باشد و می‌تواند به عنوان ماده‌ای مناسب در تراشه‌های دوپایدار استفاده شود.

است. ماتریس انتقال کل بر حسب حاصلضرب ماتریس-های انتقال لایه‌های مجاور به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M_{tot} = (M_B M_A)^N M_D M_g M_D (M_B M_A)^N = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

در معادله‌ی (۷)، N تعداد سلول‌ها را در هر بلور فوتونی مشخص می‌کند. ضریب عبور بر حسب عناصر ماتریس انتقال به صورت زیر بدست می‌آید:

$$t(\omega) = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 M_{11} + \gamma_0 \gamma_{end} M_{12} + M_{21} + \gamma_{end} M_{22}} \quad (8)$$

که γ_0 و γ_{end} مقدار γ_i در محل پرتوی ورودی و خروجی است. در نهایت عبور ساختار یک بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T(\omega) = \frac{I_{out}}{I_{in}} = |t(\omega)|^2 \quad (9)$$

که I_{in} و I_{out} شدت پرتوی ورودی و خروجی از ساختار است.

۳- بحث و نتایج محاسبات

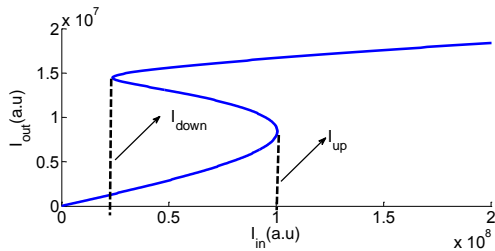
مقادیر پارامترهای استفاده شده در این مقاله به صورت زیر است:

$$E_f = 0.12 \text{ eV}, \quad v_F = 10^6 \text{ m/s}, \quad n_B = 1, \quad n_A = 1.38$$

$$d_B = d_1/4n_B, \quad d_A = d_1/4n_A, \quad d_1 = 220 \mu\text{m}$$

$$\lambda = 230 \mu\text{m}, \quad n_D = 2.5, \quad d_D = d_1/2n_D$$

ابتدا برای حالت $N=11$ و $\theta=20^\circ$ ، منحنی شدت خروجی بر حسب شدت ورودی در شکل ۲ را رسم می‌کنیم.



شکل ۲: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای $N=11$.

S شکل بودن این منحنی نشان دهنده‌ی وجود دوپایداری نوری در سیستم مورد بررسی می‌باشد. در این شکل خط چین‌های عمودی شدت آستانه‌ی بالا و پایین دوپایداری را نشان می‌دهد.

برای آنکه بدانیم مقدار N چگونه بر روی رفتار دوپایداری سیستم تأثیر می‌گذارد، در شکل ۳ نمودار شدت خروجی

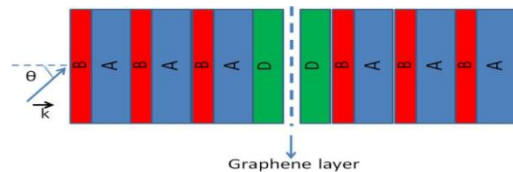
همان‌گونه که مشاهده می‌شود σ_0 و σ_3 به فرکانس موج الکترومغناطیس فرودی و انرژی فرمی بستگی دارد. بنابراین اگر از گرافن به عنوان محیط غیرخطی در یک ساختار دوپایدار استفاده شود، پدیده دوپایداری نوری را می‌توان به اعمال ولتاژ الکتریکی خارجی و تغییر فرکانس نور فرودی به راحتی کنترل کرد.

رابطه‌ی رسانندگی سطحی گرافن و گذردهی نسبی الکتریکی گرافن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\epsilon_g(\omega) = 1 + i \frac{(\sigma_{int ra} + \sigma_{int er})}{\epsilon_0 \omega d_g} + i \frac{\sigma_3 |E|^2}{\epsilon_0 \omega d_g} \quad (5)$$

ϵ_0 ضریب گذردهی الکتریکی خلأ، d_g ضخامت لایه‌ی-گرافن و $|E|$ اندازه‌ی میدان الکتریکی در محل لایه‌ی گرافن است. همان‌گونه که می‌دانیم ضریب شکست بر حسب گذردهی نسبی الکتریکی به صورت $n_g = \sqrt{\epsilon_g}$ بیان می‌شود.

بنابراین ضریب شکست لایه‌ی G به شدت نور در محل لایه بستگی دارد. در اینجا ضخامت لایه گرافنی 0.35 nm در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرحواره‌ی از ساختار دوپایدار بر پایه‌ی لایه‌ی گرافن.

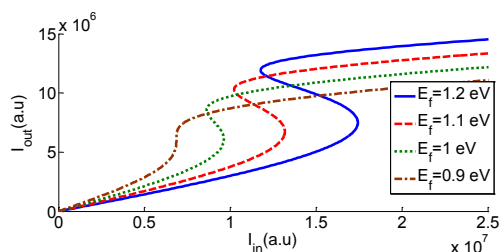
در این مقاله، برای بررسی اثر دوپایداری در ساختار یک بعدی شامل تک لایه‌ی گرافن، از روش ماتریس انتقال استفاده می‌شود. با توجه به غیر خطی بودن لایه گرافن، برای به دست آوردن منحنی‌های دوپایداری باید از ماتریس انتقال بهبود یافته استفاده کرد. در این روش لایه‌ی غیرخطی را به تعداد زیادی زیر لایه تقسیم می‌کنیم و از روش تکرار برای محاسبه ضریب شکست غیرخطی گرافن که تابعی از میدان الکتریکی است، استفاده می‌کنیم.

ماتریس انتقال برای مد مغناطیسی عرضی (TM) با زاویه-ی فرودی θ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_{zi} d_i) & \frac{-i}{\gamma_i} \sin(k_{zi} d_i) \\ -i\gamma_i \sin(k_{zi} d_i) & \cos(k_{zi} d_i) \end{pmatrix} \quad (6)$$

که $k_i = n_i \frac{\omega}{c}$ و $\gamma_i^2 = (\epsilon_0 / \mu_0) \epsilon_i / \cos^2 \theta_i$ ، $k_{zi} = k_i \cos \theta_i$

نشان می‌دهیم.



شکل ۵: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای انرژی‌های فرمی مختلف.

همانگونه که مشاهده می‌شود با کاهش انرژی فرمی از $1/2$ الکترون‌ولت تا $0/9$ الکترون‌ولت مقدار هر دوی آستانه‌ی دوپایداری بالا و پایین کاهش می‌یابد. علت فیزیکی این اثر آن است که در معادله‌ی (۴) قسمت غیر خطی رسانندگی با انرژی فرمی نسبت عکس دارد. پس با کاهش مقدار غیرخطیت سیستم افزایش می‌یابد و در نتیجه آستانه‌ی دوپایداری کم می‌شود. بنابراین با اعمال یک ولتاژ بایاس خارجی و تغییر زاویه‌ی فرودی می‌توان آستانه‌ی دوپایداری نوری بلور فوتونی شامل تک‌لایه‌ی گرافن را کنترل کرد.

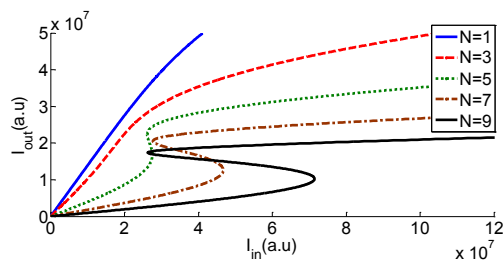
۴- نتیجه‌گیری

یک ساختار دوپایدار نوری بر پایه بلور فوتونی شامل گرافن پیشنهاد شد. محاسبات نشان داد که با افزایش تعداد سلول‌های واحد بلور فوتونی، آستانه‌ی دوپایداری ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. اثرات تغییرات زاویه‌ی فرودی و انرژی فرمی گرافن بر روی آستانه‌ی دوپایداری نوری مطالعه شد. نتایج نشان داد که آستانه‌ی دوپایداری شدیداً به زاویه‌ی فرود و انرژی فرمی بستگی دارد و کنترل آن با تغییر این کمیت‌ها امکان‌پذیر است.

مراجع

- [1] R. W. Boyd, Nonlinear optics: Academic press, 3 ed, (2003).
- [2] M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, X. Zhang, "A graphene-based broadband optical modulator", Nature 474, 64–67 (2011).
- [3] R. Wu, Y. Zhang, S. Yan, F. Bian, W. Wang, X. Bai, X. Lu, J. Zhao, and E. Wang, "Purely coherent nonlinear optical response in solution dispersions of graphene sheets," Nano. Lett. 11, 5159–5164 (2011).
- [4] X. Dai, L. Jiang, and Y. Xiang. "Tunable optical bistability of dielectric/nonlinear graphene/dielectric heterostructures" Opt. Exp, 23, 6497-6508 (2015).
- [5] E. Hendry, P. J. Hale, J. Moger, A. K. Savchenko, and S. A. Mikhailov, "Coherent nonlinear optical response of graphene," Phys. Rev. Lett. 105, 097401-097404 (2010).

بر حسب ورودی برای N های مختلف نشان داده شده است.

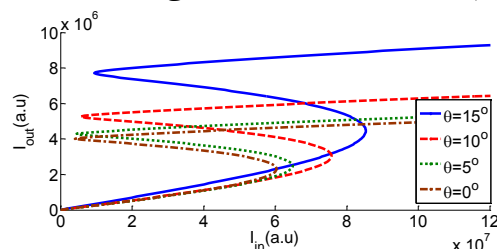


شکل ۳: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای N های مختلف.

همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، برای $N=1$ و $N=3$ دوپایداری نوری وجود ندارد. ولی هنگامی که مقدار N از ۵ بیشتر می‌شود دوپایداری نوری به وضوح در منحنی‌ها دیده می‌شود. دلیل این امر آن است که با افزایش N ، مقدار فرکانس رزونانس سیستم به فرکانس نور موج فرودی نزدیک می‌شود. هنگامی که مقدار N از ۵ تا ۹ افزایش می‌یابد میزان آستانه بالای دوپایداری (I_{UP}) بیشتر می‌شود. علت فیزیکی این اثر دور شدن فرکانس مد رزونانسی سیستم از فرکانس نور فرودی است.

حال مقدار $N=10$ را در نظر می‌گیریم و چگونگی وابستگی آستانه‌ی دوپایداری نوری را به زاویه‌ی فرودی بررسی می‌کنیم. نتایج محاسبات در شکل ۴ نشان داده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار زاویه فرودی از 0 تا 15 درجه مقدار آستانه‌های بالا و پایین افزایش می‌یابد ولی میزان افزایش آستانه‌ی بالا بسیار بیشتر از آستانه‌ی پایین است. دلیل این امر آن است که با افزایش زاویه‌ی فرودی، اختلاف بین فرکانس تشدید سیستم و فرکانس نور فرودی بیشتر می‌شود.



شکل ۴: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای زاویه‌های فرودی مختلف.

حال اثر تغییرات انرژی فرمی گرافن بر روی خواص دوپایداری در ساختار پیشنهاد شده بررسی می‌شود. در اینجا $N=6$ و $\theta=0^\circ$ قرار می‌دهیم و نتایج را در شکل ۵