

مقاله نامه

دوازدهمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران

۱۳۸۴

۱۱ تا ۱۳ بهمن ماه

دانشگاه شیراز

انجمن اپتیک و فوتونیک ایران

OPSI



گروه فیزیک، دانشگاه شیراز

Shiraz Uni. Physics Dept

تجزیه و تحلیل گافهای فوتونی در کریستال فوتونی دو بعدی هگزاگونال

بهروز رضائی، منوچهر کلافی

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده - در این مقاله تشکیل گاف فوتونی کامل در یک کریستال فوتونی دو بعدی هگزاگونال که شامل میله های دی الکتریک غیر ایزوتروپیک تلوریم (Te) در زمینه هوا است، بررسی می شود. فرض می کنیم این میله ها از یک هسته دی الکتریک که بوسیله لایه خارجی غیر ایزوتروپیک Te احاطه شده، تشکیل می یابند. تمامی گافهای فوتونی کامل در این کریستال فوتونی بر حسب تابعی از تغییرات شعاع میله داخلی و هسته دی الکتریک مطالعه می شود. این ساختار یک گاف فوتونی کامل بزرگ را نشان می دهد.

کلید واژه- امواج الکترومغناطیس، تابع دی الکتریک، شبکه هگزاگونال، کریستال فوتونی، گاف فوتونی.

کد PACS - ۷۸.۰۰

۱- مقدمه

در طی سالهای اخیر ساختارهای با ضرایب شکست منظم مانند کریستالهای فوتونی توجه زیادی را از هر دو دیدگاه تئوری و عملی به خود جلب کرده اند، زیرا مفاهیم جدیدی از قبیل گاف نوار فوتونی و کاربردهای گوناگون از کریستالهای فوتونی پیش بینی شده و دارای خواص نوری فوق العاده ای هستند و پیشرفتهای قابل ملاحظه ای برای طراحی و ساخت کریستالهای فوتونی انجام یافته است [۱]. مطالعه شکلهای هندسی متفاوت از کریستالهای فوتونی و روشهای متفاوت برای افزایش پهنای گاف نوار آنها یک نکته کلیدی در فیزیک ساختارهای دی الکتریک متناوب است. از نقطه نظر فیزیک نظری، کریستالهای فوتونی توسط ساختار نوریشان توصیف می شوند و مشخصه عمده این کریستالها، گاف فوتونی کامل (ناحیه فرکانسی که انتشار مدهای الکترومغناطیسی ممنوع است) آنها می باشد. اگرچه کریستالهای فوتونی سه بعدی ممکن است کاربردهای بیشتری داشته باشند، اما کریستالهای فوتونی دو بعدی نیز به شدت مورد مطالعه قرار گرفته اند، زیرا از نظر ساخت آسانتر بوده و ممکن است در ابزارهای نوری و الکترونیکی استفاده شوند.

در کریستالهای فوتونی دو بعدی امواج الکترومغناطیسی می توانند به مدهای قطبشی الکتریکی و مغناطیسی تجزیه شوند و بررسی تئوری آنها از این جهت آسانتر می شود. گاف فوتونی کامل برای کریستالهای فوتونی دو بعدی تنها در صورتی وجود دارد که نوارهای ممنوع برای هر دو مدهای قطبشی بطور همزمان وجود داشته و باهم همپوشانی کنند. کریستالهای فوتونی دارای کاربردهای گوناگون از قبیل موجبرهای نوری، میکروکاوکاها، و لیزرهای کریستالهای فوتونی میباشند [۲-۳]. از آنجائیکه دارا بودن گاف فوتونی بزرگ بعنوان پایه و اساس برای کریستالهای فوتونی در زمینه کاربردهای فوق می باشد، لذا هدف از انجام این تحقیق بهینه کردن پارامترهای ساختاری کریستالهای فوتونی برای بدست آوردن گاف فوتونی بزرگ می باشد.

۲- روش محاسبات

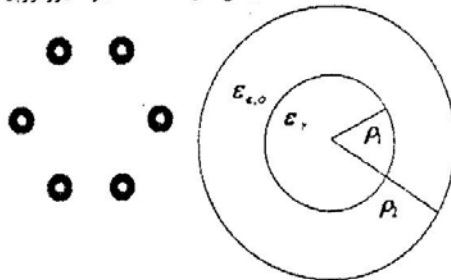
در کریستالهای فوتونی که تابع دی الکتریک، $\epsilon(r)$ ، وابستگی فضایی دارد، معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیسی بصورت زیر نوشته می شود [۴]:

$$\nabla \times E = i(\omega/c)H, \nabla \times H = -i(\omega/c)\epsilon(r)E \quad (1)$$

کریستالهای فوتونی برای هر دو قطبش بازی می کند و حاوی تمام اطلاعات ساختاری مربوط به کریستالهای فوتونی می باشد [۵].

ساختار فوتونی بررسی شده در این تحقیق بصورت یک شبکه هگزاگونال از میله های دی الکتریک استوانه ای میباشد که در زمینه ای از هوا، $\epsilon_0 = 1$ ، قرار گرفته اند (شکل ۱). فرض می کنیم که هر میله شامل یک میله داخلی با ثابت دی الکتریک ϵ_r و یک لایه خارجی است. لایه خارجی یک ماده غیر ایزوتروپیک انتخاب شده است که دارای دو محور عادی و غیر عادی میباشد. با فرض اینکه محور غیر عادی آن موازی محور میله ها باشد، این ماده برای قطبشهای مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب دارای ضرایب شکست عادی n_o و غیر عادی n_e خواهد بود بطوریکه $\epsilon_o = n_o^2$ و $\epsilon_e = n_e^2$ است.

در این مقاله لایه خارجی را ماده غیر ایزوتروپیک



شکل ۱: نمودار شمعی شبکه دو بعدی هگزاگونال متشکل از میله های دی الکتریک غیر ایزوتروپیک تلوریم با هسته دی الکتریک داخلی ϵ_r .

تلوریم (Te) انتخاب کرده ایم. این ماده دارای تک محور بلوری مثبت با ضرایب شکست عادی $n_o = 4.8$ و غیر عادی $n_e = 6.2$ می باشد. به دلیل متفاوت بودن ضرایب شکست مواد غیر ایزوتروپیک برای امواج الکترومغناطیسی با قطبشهای E و H، گاف فوتونی کامل در ساختارهای فوتونی دو بعدی به طور قابل ملاحظه ای افزایش خواهد یافت [۶]. با فرض اینکه ماده میله داخلی هوا باشد، $\epsilon_r = 1$ ، در اینصورت تنها پارامترهای قابل تنظیم برای بدست آوردن ماگزیمم گاف فوتونی، شعاعهای ρ_1 و ρ_2 خواهند بود که به ترتیب شعاع میله داخلی و شعاع خارجی لایه خارجی هستند. درحالتی که میله ها توپر هستند ($\rho_1 = 0$) ساختار فوتونی این شبکه بوسیله روش موج تخت در نرم

معادلات فوق با ساده سازی بیشتر به معادله زیر منجر می گردد:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times H \right) = \frac{\omega^2}{c^2} H \quad (2)$$

در یک کریستال فوتونی دو بعدی که شامل یک آرایه متناوب از میله های دی الکتریک می باشد، فرض می شود که میله های دی الکتریک در جهت محور z قرار گرفته اند و تقاطع آنها با صفحه x-y تشکیل یک ساختار دی الکتریک متناوب دو بعدی می دهد بطوریکه تابع $\epsilon(r)$ دارای تناوب شبکه است، فلذا می توان با استفاده از قضیه بلوخ میدان مغناطیسی را بر حسب امواج تخت بسط داد:

$$H(r) = \sum_G \sum_{\lambda=1}^2 h_{G,\lambda} \hat{e}_{\lambda} e^{i(k+G)r} \quad (3)$$

که در رابطه فوق k بردار موج در ناحیه اول بریلوئن، G بردار شبکه معکوس، $\hat{e}_1$ و $\hat{e}_2$ نیز با توجه به طبیعت عرضی بودن میدان مغناطیسی ($\nabla \cdot H = 0$)، بردارهای واحد عمود بر بردار $k + G$ هستند. با جاگذاری معادله (۳) در معادله (۲)، معادله ویژه مقداری زیر حاصل می شود [۴]:

$$\det \left| A(K, K') - \frac{\omega^2}{c^2} \right| = 0 \quad (4)$$

در یک کریستال فوتونی دو بعدی، بسته به اینکه میدان الکتریکی (مد TM) و یا میدان مغناطیسی (مد TE) موازی با محور میله ها باشد، موج الکترومغناطیسی به دو مد قطبشی الکتریکی و مغناطیسی جداگانه تبدیل می شود. بنابر این بسته به نوع قطبش دو معادله ویژه مقداری خواهیم داشت که برای قطبش الکتریکی:

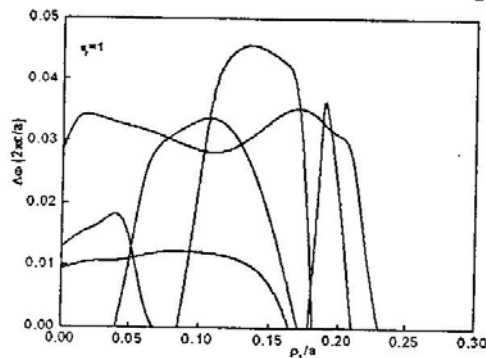
$$A(K, K') = K \| K' \| \epsilon^{-1}(G - G') \quad (5)$$

و برای قطبش مغناطیسی نیز داریم:

$$A(K, K') = K \cdot K' \epsilon^{-1}(G - G') \quad (6)$$

در روابط فوق $K = k + G$ ، $K' = k + G'$ و $\epsilon^{-1}(G - G')$ تبدیل فوریه عکس تابع دی الکتریک می باشد و نقش عمده ای را در محاسبه ساختار باند

همچنین در شکل ۴ منحنی تغییرات پهنای گافهای فوتونی بر حسب شعاع میله داخلی، ρ_1 ، بازای مقدار بهینه ρ_2 در حالتی که میله داخلی شامل دی الکتریک هواست، نشان داده شده است. ملاحظه می شود که در این حالت پهنای ماگزیمم گاف فوتونی نسبت به حالت قبلی افزایش یافته است. برای بررسی بیشتر این ساختار حالتی را در نظر می گیریم



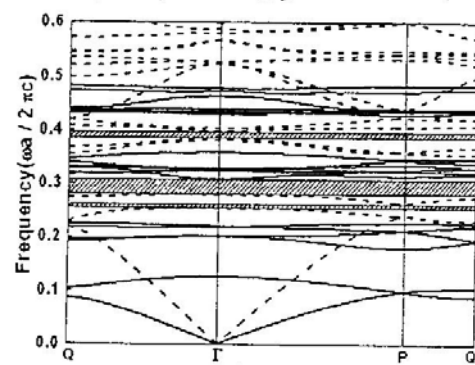
شکل ۴: پهنای گافهای فوتونی کامل بصورت تابعی از شعاع میله داخلی (ρ_1/a) بازای مقدار ثابت $\rho_2 = .33a$ برای ساختار فوتونی هگزاگونال از میله های توخالی تلوریم ($\epsilon_r = 1$) در زمینه هوا.

که در آن میله داخلی حاوی دی الکتریک غیر از هوا باشد. برای این منظور با ثابت نگه داشتن مقدار بهینه شعاع ρ_2 تغییرات پهنای گافهای فوتونی را بصورت تابعی از شعاع داخلی ρ_1 برای یک مقدار معین از ثابت دی الکتریک ϵ_r بررسی می کنیم. این کار را برای ثابتهای دی الکتریک مختلف تا مقدار $\epsilon_r = 60$ انجام داده و ماگزیمم پهنای گاف فوتونی کامل را بازای $\epsilon_r = 27$ برای مقدار بهینه شعاع داخلی $\rho_1 = .265a$ بدست آورده ایم. شکل ۵ تغییرات پهنای گافهای فوتونی کامل را بر حسب شعاع میله داخلی ρ_1 برای $\epsilon_r = 27$ نشان میدهد که ماگزیمم گاف فوتونی در این حالت برابر با $\Delta\omega = .0798(2\pi c/a)$ است و نسبت به حالتی که هسته داخلی شامل دی الکتریک هوا باشد، افزایش قابل ملاحظه ای دارد.

۳- نتیجه گیری

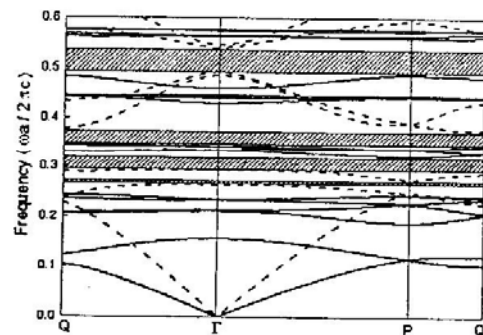
در این تحقیق یک بررسی کمی دقیق از گافهای فوتونی کامل روی ساختار فوتونی شبکه هگزاگونال دو بعدی متشکل از میله های دی الکتریک غیر ایزوتروپیک تلوریم با هسته دی الکتریک داخلی انجام یافته است. این بررسیها نشان می دهند که خواص گافهای فوتونی شدیداً به نا

افزار مطلب محاسبه شده و در شکل ۲ برای مقدار بهینه $\rho_2 = .33a$ (a ثابت شبکه می باشد) نشان داده شده است. ملاحظه می شود که این ساختار برای مقدار بهینه پارامتر ρ_2 دارای سه گاف فوتونی (نواحی هاشور خورده) است که ماگزیمم گاف فوتونی آن دارای پهنای $\Delta\omega = .0287(2\pi c/a)$ است. حال فرض می کنیم که میله داخلی شامل دی الکتریک هوا باشد ($\rho_1 \neq 0$). در این حالت با داشتن مقدار بهینه ρ_2 می توان ساختار فوتونی را برای شعاع ρ_1 بهینه کرد. شکل ۳ ساختار فوتونی محاسبه شده برای مقادیر بهینه

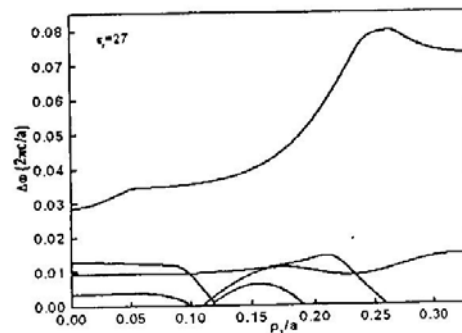


شکل ۲: ساختار باند فوتونی شبکه هگزاگونال متشکل از میله های توپر تلوریم (ϵ_r) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (بررنگ) و مغناطیسی (نقطه چین) بازای $\rho_2 = .33a$

$\rho_1 = .13a$ و $\rho_2 = .33a$ را نشان میدهد. این ساختار بهینه شده دارای چهار گاف فوتونی (نواحی هاشور خورده) است و ماگزیمم گاف فوتونی برابر با $\Delta\omega = .04581(2\pi c/a)$ می باشد.



شکل ۳: ساختار باند فوتونی شبکه هگزاگونال متشکل از میله های توخالی تلوریم (ϵ_r) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (بررنگ) و مغناطیسی (نقطه چین) بازای مقادیر بهینه $\rho_1 = .13a$ و $\rho_2 = .33a$



شکل ۵: پهنای گافهای فوتونی کامل بصورت تابعی از شعاع میله داخلی (ρ_1/a) بازای مقدار ثابت $\rho_2 = .33a$ برای ساختار فوتونی هگزاگونال از میله های تلوریم با هسته دی الکتریک $\epsilon_r = 27$ در زمینه هوا.

بتشهای دی الکتریک هسته داخلی و اندازه شعاع آن وابسته است و بطور قابل ملاحظه ای گاف فوتونی نسبت به حالتی که میله های استوانه ای تلوریم بدون هسته داخلی هستند، افزایش یافته است و این افزایش گاف فوتونی کامل از نقطه نظر عملی برای کریستالهای فوتونی در ساخت موجبرها و فیبرهای نوری یک مزیت محسوب می شود.

مراجع

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Mead, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton, 1995
- [2] A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "High Transmission Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides", *Phys. Rev. Lett.*, 77, pp. 3787-3790, 1996.
- [3] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, 58, pp. 2486-2489, 1987.
- [4] K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, "Existence of a Photonic Gap in Periodic Dielectric Structures", *Phys. Rev. Lett.*, 65, pp. 3152-3155, 1990.
- [5] M. Plihal, and A. A. Maradudin, "Photonic band Structure of two-dimensional systems: The triangular lattice", *Phys. Rev. B*, 44, pp. 8565-8571, 1991.
- [6] Zhi-Yuan Li, Ben-Yuan Gu, and Guo-Zhen Yang, "Improvement of absolute band gaps in 2D photonic crystals by anisotropy in dielectricity", *Eur. Phys. J. B*, 11, pp. 65-73, 1999.