

بررسی اثر شکل میله های دی الکتریک بر گاف نواری فوتونی در بلورهای فوتونی مربعی ناهمسانگرد

حدادی مقدم، مهسا؛ رضایی، بهروز؛ سلطانی والا، علی کلافی، منوچهر

پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده

ساختار نوار فوتونی بلورهای فوتونی ناهمسانگرد دوبعدی با شبکه مربعی شامل میله های دی الکتریک با شکل های مختلف به طور عددی مطالعه شده است. بزرگترین گاف نواری فوتونی کامل با استفاده از میله دایروی بدست می آید. در مقایسه با بلورهای فوتونی همسانگرد، که بزرگترین گاف نواری فوتونی برای میله مربعی بدست می آید، در بلورهای فوتونی ناهمسانگرد کمترین پهنای گاف نوار فوتونی حاصل می شود.

Investigation the effect of the shape of dielectric rods on the photonic band gap in anisotropic square photonic crystals

Haddadi moghaddam, Mahsa; Rezaei, Behrooz; Soltani vala, Ali; Kalafi, Manoochehr

Research institute for applied physics and astronomy, Tabriz university, Tabriz

Abstract

The photonic band structures of two-dimensional anisotropic photonic crystals of a square lattice with different shape of dielectric rods have studied numerically. The largest absolute photonic band gap is achieved by the use of cylindrical rods. In comparison with isotropic square photonic crystals, which maximum photonic band gap is obtained for square rod, the minimum width of photonic band gap is obtained in anisotropic one.

PACS No 78

فوتونی دو بعدی شامل آرایش منظم از میله های دی الکتریک موازی در یک زمینه از دی الکتریک دیگر است، که تقاطع میله ها با سطح افقی تشکیل یک شبکه دو بعدی می دهد. مشخصه این بلورها پریودیکی بودن تابع دی الکتریک و ایجاد نوارهای ممنوعه فرکانسی ناشی از تناوبی بودن شبکه می باشد. در این بلورها امواج الکترومغناطیسی به مدهای قطبشی الکتریکی و مغناطیسی تجزیه می شوند. محاسبات عددی حاکی از وجود نواحی ممنوعه فرکانسی برای هر دو قطبش الکتریکی و مغناطیسی می باشند. یک باند ممنوعه فوتونی کامل برای بلورهای فوتونی تهادار صورتی وجود خواهد داشت که باندهای ممنوعه برای هر دو قطبش به طور همزمان وجود داشته باشند و با هم همپوشانی کنند.

مقدمه

در طی سالهای اخیر مطالعه انتشار امواج الکترومغناطیس در ساختارهای دی الکتریک متناوب (معروف به بلورهای فوتونی) توجه زیادی را به خود جلب کرده اند [۱]. این ساختارها دارای یک ناحیه فرکانسی ممنوع (گاف فوتونی) هستند که امواج الکترومغناطیسی نمی توانند انتشار یابند. از آنجا که دارا بودن گاف فوتونی بزرگ به عنوان پایه و اساس برای کاربردهای گوناگون از بلورهای فوتونی مانند موجبرها و لیزرهای کریستال فوتونی به شمار می رود [۲، ۳]، بنابراین تلاش بر این است که با بهینه کردن پارامترهای ساختاری بتوان پهنای گاف فوتونی را ماگزیمم کرد. بلورهای فوتونی دو بعدی از جهت آسان بودن ساخت و کاربرد آنها در وسایل اپتیکی و الکتریکی برای مطالعه مناسبترند. بلورهای

و با حل مشابه برای مد قطبشی H (میدان مغناطیسی موازی محور میله‌ها) داریم:

$$\sum_{\vec{G}'} \eta(\vec{G} - \vec{G}') \bar{B}(\vec{k} | \vec{G}') (\vec{k} + \vec{G}') \cdot (\vec{k} + \vec{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} \bar{B}(\vec{k} | \vec{G}) \quad (6)$$

این دو معادله رابطه بین ω و \vec{k} (ساختار باند فوتونی) را برای دو قطبش الکتریکی و مغناطیسی نتیجه می‌دهند که به صورت عددی حل می‌شوند. از همپوشانی این دو باند، ساختار باند فوتونی کامل بدست می‌آید.

نتایج و بحث

در این مقاله ساختار باند بلور فوتونی دو بعدی ساخته شده از ماده ناهمسانگرد در شبکه مربعی با شکل‌های مختلف از میله‌های دی الکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. میله‌ها از جنس تلوریوم (Te) می‌باشند که در زمینه هوا قرار گرفته‌اند. ماده ناهمسانگرد تلوریوم دارای دو ضریب شکست متفاوت عادی n_e و غیر عادی n_o می‌باشد. برای مدهای قطبشی الکتریکی و مغناطیسی ضرایب شکست تلوریوم به ترتیب برابر n_e و n_o است.

ساختار باند بلور فوتونی برای مدهای قطبشی الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب از حل عددی معادلات (۵) و (۶) بدست می‌آیند. در این محاسبات تعداد ۶۲۵ موج تخت در نظر گرفته شده است که همگرایی لازم برای فرکانس‌های مطلوب حاصل می‌شود. برنامه کامپیوتری مربوط به این محاسبات در نرم افزار مطلب نوشته شده است. شکل‌های مختلفی که برای سطح مقطع میله‌ها در شبکه مربعی در نظر گرفته شده است عبارتند از: مربعی، بیضوی، هگزاگونال و دایروی. طیف فرکانسی برای چنین ساختارهایی با استفاده از روش موج تخت محاسبه شده است.

بطور خلاصه فقط نتایج مربوط به ساختارهای مختلف با پارامترهای بهینه که دارای ماگزیمم گاف فوتونی کامل می‌باشند، در شکل‌های ۱-۴ نشان داده شده‌اند.

برای افزایش پهنای نوار ممنوعه فوتونی دیدگاه‌های زیادی مطرح شده است. کاهش تقارن [۴] و ایجاد ناهمسانگردی در میله‌های دی الکتریک [۶ و ۵] تاثیر زیادی در افزایش پهنای گاف فوتونی کامل دارد. در این تحقیق هدف این است که با ایجاد ناهمسانگردی در میله‌های دی الکتریک و با در نظر گرفتن شکل‌های مختلف از میله‌ها، تغییرات گاف فوتونی کامل را مورد بررسی قرار دهیم.

روش محاسبات

برای تعیین ساختار باند فوتونی در ساختارهای دی الکتریک متناوب، انتشار نور را با استفاده از معادلات ماکسول و روش بسط موج تخت بررسی می‌کنند. با حل معادلات ماکسول برای میدان مغناطیسی داریم [۷]:

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

$\epsilon(\vec{r})$ تابع دی الکتریک وابسته به مکان است و شرط بلوخ را ارضا می‌کند بنابراین می‌توان میدان مغناطیسی $H(\vec{r})$ و تابع دی الکتریک را بصورت زیر بر حسب امواج تخت بسط داد:

$$H(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \bar{A}(\vec{k} | \vec{G}) e^{i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} \quad (2)$$

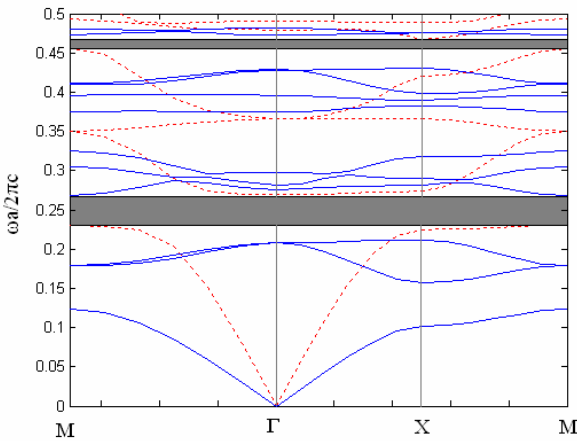
$$\epsilon^{-1}(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \eta(\vec{G}) e^{i\vec{G} \cdot \vec{r}} \quad (3)$$

\vec{k} بردار موج در منطقه اول بریلوئن و \vec{G} بردار انتقال شبکه معکوس می‌باشد. ضریب فوریه $\eta(\vec{G})$ نقش اساسی در تعیین ساختار باند فوتونی دارد:

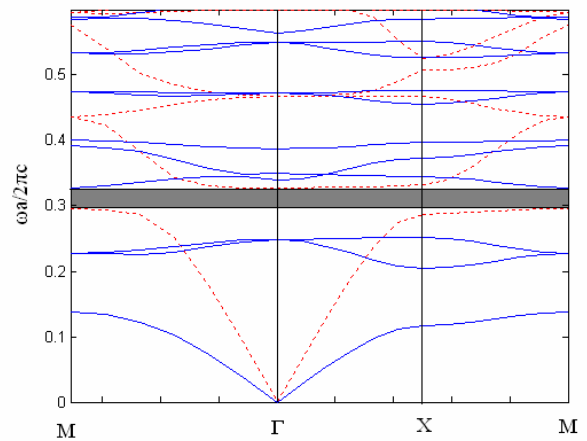
$$\eta(\vec{G}) = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} d\vec{r} e^{-i\vec{G} \cdot \vec{r}} \epsilon^{-1}(\vec{r}) \quad (4)$$

در رابطه فوق Ω حجم سلول اولیه را نشان می‌دهد. نحوه قرار گرفتن و شکل سطح مقطع میله‌های واقع در سلول واحد، بر ساختار باند فوتونی تاثیر زیادی دارد. با قرار دادن روابط بالا در معادله ویژه مقداری (۱)، معادله ای برای قطبش E (میدان الکتریکی موازی محور میله‌ها) بدست می‌آید:

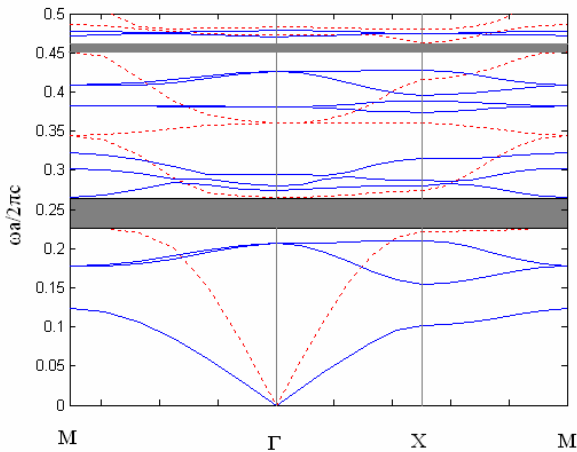
$$\sum_{\vec{G}'} \eta(\vec{G} - \vec{G}') \bar{A}(\vec{k} | \vec{G}') | \vec{k} + \vec{G}' | | \vec{k} + \vec{G} | = \frac{\omega^2}{c^2} \bar{A}(\vec{k} | \vec{G}) \quad (5)$$



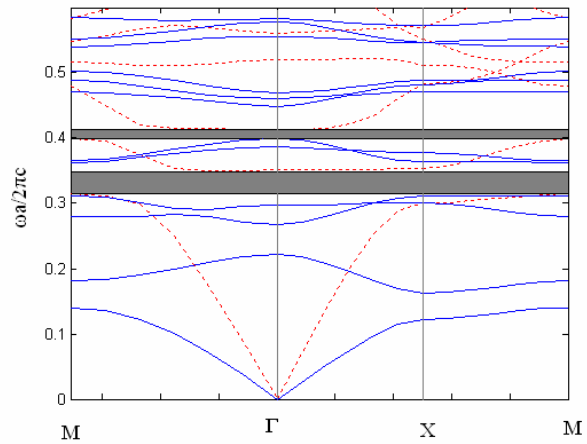
شکل ۳: ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله های هگزاگونال تلوریوم (Te) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (نقطه چین) و مغناطیسی (پررنگ) به ازای $r=0.39a$.



شکل ۱: ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله های مربعی تلوریوم (Te) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (نقطه چین) و مغناطیسی (پررنگ) به ازای $r=0.505a$.



شکل ۴: ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله های دایروی تلوریوم (Te) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (نقطه چین) و مغناطیسی (پررنگ) به ازای $r=0.357a$.



شکل ۲: ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله های بیضوی تلوریوم (Te) در زمینه هوا برای مدهای الکتریکی (نقطه چین) و مغناطیسی (پررنگ) به ازای $\rho_2/\rho_1=0.46$ و $\rho_1=0.43a$.

بیضی هستند. این ساختار دارای دو گاف فوتونی کامل است که پهنای بزرگترین گاف فوتونی کامل برابر $\Delta\omega = 0.0369(2\pi c/a)$ می باشد و در ناحیه فرکانسی $(0.3141 - 0.3510)(2\pi c/a)$ قرار دارد. ملاحظه می شود که پهنای گاف فوتونی در این حالت نسبت به میله های مربعی افزایش یافته است. در گام بعدی شبکه مربعی با میله های هگزاگونال را در نظر گرفته ایم. طیف فرکانسی مربوط به این ساختار در شکل ۳ بازای مقدار بهینه $r=0.39a$ (طول هر ضلع هگزاگونال) رسم شده است. این شبکه نیز دو گاف فوتونی کامل را نشان می دهد که

در شکل ۱ ساختار باند بلور فوتونی شبکه مربعی با میله های مربعی برای مقدار بهینه $r=0.505a$ رسم شده است که در آن Γ طول هر ضلع مربع می باشد. این شکل یک گاف فوتونی کامل با پهنای $\Delta\omega = 0.0317(2\pi c/a)$ را نشان می دهد که ما بین فرکانس های $(0.2959 - 0.3276)(2\pi c/a)$ قرار گرفته است، بطوریکه انتشار امواج الکترومغناطیسی در این ناحیه ممنوع است. دومین حالت، شبکه مربعی با میله های بیضوی است. شکل ۲ ساختار باند فوتونی این شبکه را در مقادیر بهینه $\rho_1=0.43a$ و $\rho_2/\rho_1=0.46$ نشان می دهد که در آن ρ_1 و ρ_2 شعاع های

این جدول پهنای ماگزیمم گاف فوتونی کامل $\Delta\omega$ را همراه با فرکانس های متناظر پایین و بالا (ω_1, ω_2) برای میله های مختلف در شبکه مربعی نشان میدهد. در این جدول f فاکتور پراشدهی می باشد که بصورت نسبت مساحت میله به مساحت سلول اولیه تعریف می شود.

نتیجه گیری

محاسبات عددی نشان می دهند که وقتی میله های دی الکتریک ناهمسانگرد باشند، یکسان بودن شکل میله با شکل منطقه اول بریلونن شبکه اهمیت خود را از دست می دهد. برای شبکه مربعی، میله دایروی که بیشترین تقارن را دارد، بزرگترین پهنای نوار ممنوعه بدست می آید.

مرجع ها

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", Phys.Rev.Lett.58, 2059 - 2062(1987)
- [2] A. Mekis, J.C.Chen, I.Kurland, "High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides", Phys.Rev.Lett.77, 3787-3790 (1996)
- [3] S.John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices", Phys.Rev.Lett.58, 2486-2489 (1987)
- [4] N.Susa, "Large absolute and polarization-independent photonic band gap for various structures and rod shapes", J.Appl.Phys. Vol91. Num6. 3501-3510(2002)
- [5] Z.Y.Li, G.Z. Yang, "large absolute band gap in 2D anisotropic photonic crystal", Phys.Rev.Lett. Vol81. Num12. 2574 - 2577(1998)
- [6] Z-Yuan.Li, B-Y.Gu, G-Z Yang, "Improvement of absolute band gap in 2D photonic crystals by anisotropy in dielectricity", Eur.Phys.J.B11. 65-73(1999)
- [7] R.Wong, Xue-H Wong, "Effect of shape and orientations of scatterers and lattice symmetries on the photonic band gap in 2D photonic crystal", J.Appl.Phys, vol90, num9, 4307-4313(2001)

بزرگترین گاف فوتونی دارای پهنای $\Delta\omega = 0.0383(2\pi c/a)$ می باشد و در محدوده فرکانسی $0.2686-0.2303(2\pi c/a)$ قرار گرفته است. در مقایسه با دو حالت قبلی پهنای گاف فوتونی باز هم افزایش یافته است. در پایان شبکه مربعی با میله های دایروی را در نظر می گیریم. ساختار باند فوتونی مربوط به این شبکه بازای شعاع بهینه $r=0.357a$ برای میله دایروی در شکل ۴ نشان داده شده است. این شکل دو ناحیه فرکانسی ممنوع را نشان می دهد که بزرگترین ناحیه ممنوع فرکانسی دارای پهنای $\Delta\omega = 0.0390(2\pi c/a)$ می باشد و مابین فرکانسهای $0.2653-0.2263(2\pi c/a)$ قرار می گیرد.

این نتایج نشان می دهند که در شبکه مربعی با میله های مربعی مطابق شکل ۱، گاف فوتونی کامل کمترین پهنای را دارد در صورتیکه برای شبکه مربعی با میله دایروی مطابق شکل ۴ بزرگترین نوار ممنوعه حاصل می شود.

در مورد مواد همسانگرد وقتی که شکل میله ها مشابه با شکل منطقه اول بریلونن شبکه باشد نوار ممنوعه فوتونی بزرگتری بدست می آید [۷]. بطوریکه برای شبکه مربعی با میله مربعی نوار ممنوعه بزرگتری حاصل می شود. اما محاسبات انجام یافته در این تحقیق نشان می دهند که در مواد ناهمسانگرد این نتیجه درست نمی باشد.

در جدول ۱ نتایج عددی مربوط به ساختارهای مختلف با پارامترهای بهینه نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج عددی ساختارهای مختلف با پارامترهای بهینه

شکل میله	f	$\Delta\omega$ ($2\pi c/a$)	ω_1 ($2\pi c/a$)	ω_2 ($2\pi c/a$)
دایره	۰/۴	۰/۰۳۹۰	۰/۲۲۶۳	۰/۲۶۵۳
هگزاگونال	۰/۳۹۵	۰/۰۳۸۳	۰/۲۳۰۳	۰/۲۶۸۶
بیضی	۰/۲۶۷	۰/۰۳۶۹	۰/۳۱۴۱	۰/۳۵۱۰
مربع	۰/۲۵۵	۰/۰۳۱۷	۰/۲۹۵۹	۰/۳۲۷۶