بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

مقایسه گاف باندهای سه نوع بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی شبه‌متناوب با بلور فوتونی متناوب

عبدالرحمن نامدار، مهدی حسن پور

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز

چکیده – در این مقاله گاف باندهای سه نوع بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی شبه متناوب با بلور فوتونی متناوب را با استفاده از روش ماتریس انتقال مقایسه می‌کنیم. وابستگی گاف باند فوتونی به چگالی و ضخامت پلاسما و همچنین زاویه و قطبش موج فرودی را مورد بررسی قرار می‌دهیم، همچنین به مقایسه نحوه ی پاسخ گویی هر یک از این سه نوع بلور شبه متناوب و متناوب به متغییرهای عنوان شده می‌پردازیم. این نتایج می‌تواند ما را برای انتخاب ایده‌آل‌ترین ساختار برای استفاده در بلورهای فوتونی پلاسمایی یاری کند.

کلید واژه- بلور فوتونی، پلاسما، روش ماتریس انتقال، شبه تناوب فیبوناچی، گاف باند

Comparison of three type of quasiperiodic one-dimensional plasma photonic crystal band gap with periodic photonic crystal

Abdolrahman Namdar, Mehdi Hasanpour

Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper we compare the photonic band gap of three type of quasiperiodic one-dimensional plasma photonic crystal with periodic photonic crystal by use of transfer matrix method. The dependence of photonic band gap to density and thickness of plasma and angle and polarization of incidence EM wave are investigated. Also we compare the response of this three type of quasiperiodic photonic crystal and periodic photonic crystal to mentioned parameter. These results can be help us to choose the best structure for use in plasma photonic crystal.

Keywords: Plasma, Photonic crystal, Tansfer matrix method, Quasiperiodic, Band gap

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

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

۱- مقدمه

بلور فوتونی پلاسمایی به صورت ساختاری متناوب که از پلاسما و سایر مواد دی‌الکتریک در یک، دو یا سه بعد تشکیل شده است، تعریف می‌شود[2-1]. پلاسما نوعی ماده پاشنده است، یعنی ضریب شکست آن به فرکانس موج الکترومغناطیسی فرودی وابسته است. همین ویژگی بلورهای فوتونی پلاسمایی را از سایر بلورهای فوتونی معمول متمایز می‌کند. بلورهای فوتونی به دلیل اینکه بازه‌ایی از فرکانس های موج الکترومغناطیسی فرودی را از خود عبور نمی‌دهند مورد توجه قرار گرفته‌اند، به این بازه فرکانسی، گاف باند فوتونی گفته می‌شود. این گاف باندها به دلیل تغییر تناوبی ثابت دی‌الکتریک یا ضریب شکست مواد موجود در بلور فوتونی ایجاد می‌شود. پهنای این گاف باند ها به هندسه، اندازه، جاگیری و ذات مواد موجود در بلور فوتونی وابسته هستند. دلیل علاقه به گاف باند بلورهای فوتونی، کاربردهای آن در ناحیه های تحقیقاتی و تکنولوژیکی مانند فیلترها، موجبرها، کلیدهای اپتیکی، کاواک‌ها و... است[5-3]. در این مقاله ما گاف باند بلورهای فوتونی پلاسمایی را بر اساس شبه‌تناوب های دودوره‌ی، تو-مورس، فیبوناچی و ساختار متناوب دوتایی بررسی می‌کنیم. ما یک بلور فوتونی سه تایی متشکل از پلاسما، شیشه کوارتز و هوا را در نظر می‌گیریم و گاف باند را برای هر چهار ساختار به دست می‌آوریم و تاثیر ضخامت و چگالی پلاسما و همچنین زاویه فرودی موج الکترومغناطیسی را روی آنها بررسی می‌کنیم.

۲- مدل نظری و روش عددی

ما یک ساختار متناوب لایه‌ای یک بعدی که متشکل از شیشه کوارتز(لایه a)، هوا(لایه b) و پلاسما(لایه p) است را در نظر می‌گیریم. ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله شامل دودوره‌ای، تو-مورس، فیبوناچی و دوتایی است که نحوه‌ی شکل‌گیری‌شان به وسیله روابط: $D \to DC$، $C \to DD$ (دودوره-ای)، $D \to DC$، $C \to D$ (فیبوناچی)، $D \to DC$ ، $C \to CD$ (تو-مورس)، $D \to DC$ ، $C \to DC$ (دوتایی) داده می‌شود، که در آنها C لایه پلاسما و D همان لایه هوا و شیشه کوارتز با هم هستند. برای مثال تناوب سوم هر یک از آنها به صورت $G_3 = pabpppabpdb$ (دودوره‌ای)، $G_3 = pababpabppmb$ (تو-مورس)، $G_3 = pabppabpalp$ (فیبوناچی) و $G_3 = pabpabpabpmb$ (دوتایی) است. همان طور که می دانیم پلاسما یک نوع دی‌الکتریک وابسته به فرکانس است که ثابت دی‌الکتریک آن از مدل درود پیروی می-کند[6]. طبق رابطه زیر

$$\varepsilon_p(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j(\nu_c \omega)} \qquad (1)$$

که در آن ω_p و ν_c به ترتیب فرکانس پلاسما و فرکانس برخورد الکترون هستند. فرکانس پلاسما از رابطه $\omega_p = \left(\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m}\right)^{\frac{1}{2}}$ پیروی می‌کند که در آن e ، m و n_e به ترتیب بار الکترون، جرم الکترون و چگالی پلاسما هستند و ε_0 ثابت دی‌الکتریک خلا می باشد.

موج الکترومغناطیسی از خلا با زاویه θ به بلور فوتونی برخورد می‌کند برای محاسبه بازتاب در ساختار چندلایه فیبوناچی از روش ماتریس انتقال استفاده می‌کنیم[7]. بر طبق این روش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر دو نقطه از لایه‌های مجاور توسط رابطه زیر به هم مربوط می‌شوند.

$$M_k = \begin{pmatrix} \cos\beta_l & \frac{-j}{p_l}\sin\beta_l \\ -jp_l \sin\beta_l & \cos\beta_l \end{pmatrix} \qquad (2)$$

در این رابطه $\beta_l = k_0 n_l d_l \cos\theta_l$ و $p_l = \frac{n_l}{z_0}\cos\theta_l$ برای موج TE و $p_l = \frac{1}{z_0 n_l}\cos\theta_l$ برای موج TM با $l = a, p$ و امپدانس خلا $z_0 = \frac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{\varepsilon_0}}$ است. در اینجا d_l ضخامت و n_l ضریب شکست لایه هاست. ماتریس انتقال کل ساختار می‌تواند از رابطه بازگشتی زیر به دست آید.

$$M_N = M_{N-1} M_{N-2} \qquad (N \geq 2) \qquad (3)$$

بنابراین ماتریس کل M از رابطه زیر به دست می آید.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

$$M=\prod_{k=1}^{N}M_k=\begin{pmatrix}M_{11} & M_{12}\\ M_{21} & M_{22}\end{pmatrix} \qquad (4)$$

ضریب بازتاب ساختار در نظر گرفته شده به وسیله رابطه زیر به دست می‌آید.

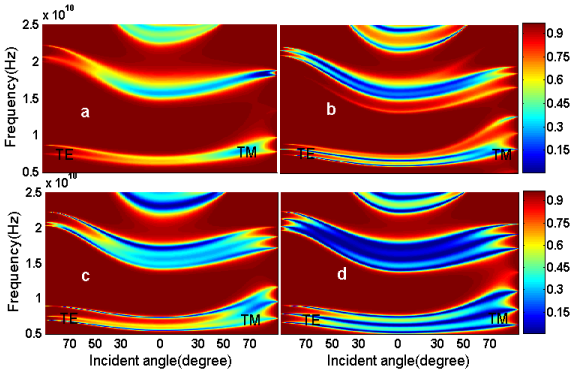
$$r=\frac{(M_{11}+M_{12}p_s)p_0-(M_{21}+M_{22}p_s)}{(M_{11}+M_{12}p_s)p_0+(M_{21}+M_{22}p_s)} \qquad (5)$$

در اینجا p_0 و p_s مربوط به محیط‌های اول و آخر هستند که توسط رابطه‌های $p_0=\frac{n_0\cos\theta_0}{z_0}$ و $p_s=\frac{n_s\cos\theta_s}{z_0}$ برای موج TE و $p_0=\frac{\cos\theta_0}{n_0 z_0}$ ، $p_s=\frac{\cos\theta_s}{n_s z_0}$ برای موج TM داده می‌شوند. محیط‌های اول و آخر را خلا در نظر گرفتیم. بازتاب کل با رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R=|r|^2 \qquad (6)$$

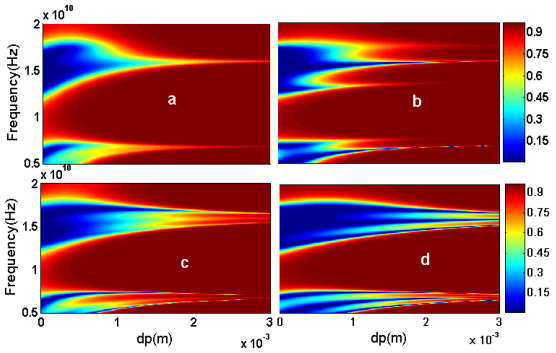
۳- نتایج و بحث

پارامترهای انتخابی برای لایه a (شیشه کوارتز) $\varepsilon_a=4$، $\mu_a=1$، $d_a=5mm$ و برای لایه b (هوا) $\varepsilon_b=1$، $\mu_b=1$، $d_b=5mm$ و برای لایه p (پلاسما) $d_p=1.0mm$، $n_e=n_1=1\times10^{19}m^{-3}$، $\omega_p=2\pi\times28.4\times10^9\ rad/s$ و $\nu=2\pi\times10^6\ rad/s$ در نظر می‌گیریم. ابتدا گاف باند بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی را برای هر چهار ساختار معرفی شده برای تمام زوایا و قطبش های موج فرودی رسم می‌کنیم. همان طور که از شکل ۱ دیده می‌شود در ساختار دودوره‌ای بزرگترین گاف باند فوتونی به دست می‌آید، کوچکترین گاف باند فوتونی نیز مربوط به شبه تناوب تو-مورس می‌باشد. در هر چهار تناوب لبه های بالایی و پایینی گاف باند با افزایش زاویه به سمت فرکانس های بالاتر کشیده می‌شود که میزان این کشیدگی برای شبه تناوب دودوره‌ای محسوس‌تر می‌باشد.



شکل۱: ساختار گاف باند بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی برای چهار تناوب بر حسب فرکانس برای تمام زوایا و قطبش های TE و TM و ضخامت‌های $d_a=5mm$ ، $d_p=1mm$ ، $d_b=5mm$ (شکل۱a شبه‌تناوب دودوره ای، شکل۱b شبه‌تناوب تو-مورس، شکل۱c شبه تناوب فیبوناچی و شکل۱d تناوب دوتایی) (در نمودار رنگ‌ها معرف ضرایب بازتاب می‌باشند)

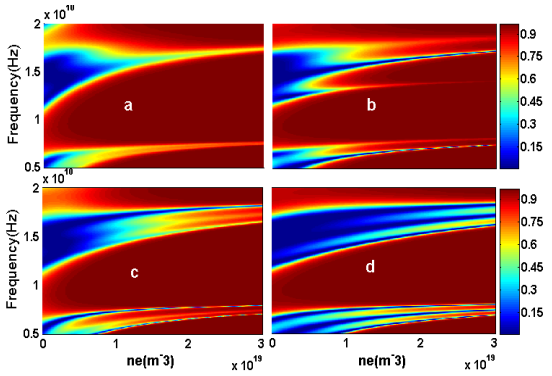
سپس وابستگی گاف باند فوتونی به ضخامت لایه پلاسما را برای بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی را برای هر چهار ساختار بررسی می‌کنیم. همان طور که از شکل ۲ دیده می‌شود، تغییرات گاف باند فوتونی نسبت به تغییر ضخامت لایه پلاسما در ساختار دودوره‌ای بیشتر از دیگر ساختارها است. میزان این تغییرات در شبه تناوب تو-مورس نیز کمترین مقدار را دارد. برای ساختارهای فیبوناچی و دوتایی میزان تغییرات گاف باند فوتونی تقریبا یکسان است. در ضمن نمودارهای گاف باند برای هر دو قطبش TM و TE دقیقا یکسان به دست می‌آیند.



شکل۲: ساختار گاف باند بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی برای چهار تناوب بر حسب فرکانس به صورت تابعی از ضخامت لایه پلاسما برای تمام زوایا و قطبش های TE و TMوضخامت‌های $d_a=5mm$ ، $d_b=5mm$ (شکل۱a شبه‌تناوب دودوره ای، شکل۱b شبه‌تناوب تو-مورس، شکل۱c شبه‌تناوب فیبوناچی و شکل۱d تناوب دوتایی)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]

در مرحله بعد تاثیر چگالی لایه پلاسما را بر روی گاف باند بلور فوتونی برای هر چهار ساختار بررسی می‌کنیم. چگالی پلاسما را از 0 تا $3n_e$ افزایش می‌دهیم. تغییرات گاف باند بلور فوتونی را در شکل ۳ رسم شده است. همان طور که دیده می‌شود تغییرات گاف باند فوتونی نسبت به تغییر چگالی لایه پلاسما در ساختار دودوره‌ایی بیشترین مقدار را دارد و با افزایش چگالی پلاسما پهنای گاف باند افزایش می‌یابد، در سایر ساختارها نیز همین افزایش پهنای گاف باند مشاهده می شود ولی در تناوب دودوره‌ای محسوس‌تر می باشد. این تغییرات در تناوب تو-مورس کمترین مقدار را دارد.



شکل ۳: ساختار گاف باند بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی برای چهار تناوب بر حسب فرکانس به صورت تابعی از چگالی لایه پلاسما برای تمام زوایا و قطبش های TE و TMوضخامت‌های $d_b = 5mm$ ،$d_p = 1mm$ ،$d_a = 5mm$ (شکل۱a شبه‌تناوب دودوره ای، شکل۱b شبه‌تناوب تو-مورس، شکل۱c شبه‌تناوب فیبوناچی و شکل۱d تناوب دوتایی)

۴- نتیجه‌گیری

گاف باند بلور فوتونی حاوی پلاسما، شیشه‌ی کوارتز و هوا را برای سه شبه‌تناوب متداول و یک ساختار متناوب بررسی کردیم. وابستگی گاف باند فوتونی به ضخامت و چگالی پلاسما وهمچنین زاویه وقطبش موج فرودی را برای هر چهار ساختار مورد بررسی قرار دادیم. با توجه به داده های عددی به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که ساختار دودوره‌ای یک ساختار ایده‌آل نسبت به سایر ساختارها برای به کارگیری در چنین بلورهای فوتونی پلاسمایی می‌باشد.

مراجع

[1] H. Hojo, K. Akimoto and A. Mase, Conference Digest on 28th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves (Otsu, Japan, Sept.28-Oct.2, 2003), 347-348.

[2] H. Hojo, N. Uchida, K. Hattori and A. Mase, Plasma and Fusion Research 1, 021-1-2 (2006).

[3] G. Guida, A. de Lustrac, A. Priou, "*An introduction to photonic band gap (PBG) materials*", **PIER** 41 (2003) 1–20.

[4] E. Ozbay, B. Temelkuran, M. Bayindir, "*Microwave applications of photonic crystals*", **PIER** 41 (2003) 185–209

[5] C.J. Wu, "*Transmission and reaction in a periodic super-conductor/dielectric. lm multilayer structure*", **JEMWA** 19 (2006) 1991–1996.

[6] H.-F. Zhang, S.-B. Liu, X.-K. Kong, L. Zou, C.-Z. Li, and W. Qing, "*Enhancement of omnidirectional photonic band gaps in one-dimensional dielectric plasma photonic crystals with a matching layer*," ***Phys. Plasmas*** 19, 2, 022103, 2012.

[7] M. Born and E. Wolf, *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. CUP Archive, 1999.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-14]