

بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران (م 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 ایدهآل ترین ساختار برای استفاده در بلورهای فوتونی پلاسمایی یاری کند.

كليد واژه- بلور فوتونى، پلاسما، روش ماتريس انتقال، شبه تناوب فيبوناچى، 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

#### ۱– مقدمه

بلور فوتونی پلاسمایی به صورت ساختاری متناوب که از پلاسما و سایر مواد دیالکتریک در یک، دو یا سه بعد تشكيل شده است، تعريف مي شود [2-1]. پلاسما نوعي ماده پاشنده است، يعنى ضريب شكست آن به فركانس موج الكترومغناطيسي فرودي وابسته است. همين ويژگي بلورهای فوتونی پلاسمایی را از سایر بلورهای فوتونی معمول متمایز می کند. بلورهای فوتونی به دلیل اینکه بازهایی از فرکانس های موج الکترومغناطیسی فرودی را از خود عبور نمی دهند مورد توجه قرار گرفتهاند، به این بازه فركانسی، گاف باند فوتونی گفته می شود. این گاف باندها به دلیل تغییر تناوبی ثابت دیالکتریک یا ضریب شکست مواد موجود در بلور فوتونی ایجاد می شود. پهنای این گاف باند ها به هندسه، اندازه، جاگیری و ذات مواد موجود در بلور فوتونى وابسته هستند. دليل علاقه به گاف باند بلورهای فوتونی، کاربردهای آن در ناحیه های تحقیقاتی و تكنولوژيكى مانند فيلترها، موجبرها، كليدهاى اپتيكى، كاواكها و... است[5-3]. در اين مقاله ما گاف باند بلورهاي فوتونى يلاسمايي را بر اساس شبهتناوب هاى دودورەي، تو-مورس، فيبوناچى و ساختار متناوب دوتايى بررسى مىكنيم. ما يك بلور فوتونى سه تايى متشكل از پلاسما، شیشه کوارتز و هوا را در نظر می گیریم و گاف باند را برای هر چهار ساختار به دست می آوریم و تاثیر ضخامت و چگالی پلاسما و همچنین زاویه فرودی موج الكترومغناطيسي را روى آنها بررسي ميكنيم.

#### ۲- مدل نظری و روش عددی

ما یک ساختار متناوب لایهای یک بعدی که متشکل از شیشه کوارتز(لایه a)، هوا(لایه d) و پلاسما(لایه q) است را در نظر می گیریم. ساختارهای مورد مطالعه در این مقاله شامل دودورهای، تو-مورس، فیبوناچی و دوتایی است که نحوهی شکل گیریشان به وسیله روابط: $D \to DC$  ،  $D \to DC$  (دودوره-ای)، $D \to DC - O$  (فیبوناچی)،  $D \to DC$  ،  $C \to CD$  ،  $D \to CC$ ای)، $D \to C - CD$  (فیبوناچی)،  $D \to C \to CD$ ای)، $C \to CD$  ،  $D \to DC$  (دوتایج) می داده می شود، که در آنها C لایه پلاسما و D همان لایه هوا و شیشه کوارتز با هم هستند. برای مثال

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

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

موج الکترومغناطیسی از خلا با زاویه  $\theta$  به بلور فوتونی برخورد می کند برای محاسبه بازتاب در ساختار چندلایه فیبوناچی از روش ماتریس انتقال استفاده می کنیم[7]. بر طبق این روش میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در هر دو نقطه از لایههای مجاور توسط رابطه زیر به هم مربوط می شوند.

$$M_{k} = \begin{pmatrix} \cos \beta_{l} & \frac{-j}{p_{l}} \sin \beta_{l} \\ -jp_{l} \sin \beta_{l} & \cos \beta_{l} \end{pmatrix}$$
(2)

$$p_l = \frac{n_l}{z_0} \operatorname{co} \Theta_l \quad \boldsymbol{\beta}_l = k_0 n_l d_l \cos \theta_l \quad \boldsymbol{\alpha}_l$$
در این رابطه

برای موج TE و 
$$p_l = \frac{1}{z_0 n_l} \operatorname{co} \theta_l$$
 برای موج TE با TM برای موج

$$d_l$$
 و امپدانس خلا  $z_0 = rac{\sqrt{\mu_0}}{\sqrt{arepsilon_0}}$  است. در اینجا  $l = a, p$ 

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

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

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

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

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

در اینجا  $p_0 = p_0 = \frac{p_0 \cos \theta_0}{z_0}$  مربوط به محیطهای اول و آخر هستند که توسط رابطههای TE و  $p_0 = \frac{n_0 \cos \theta_0}{z_0}$  و  $p_0 = \frac{c \circ \theta_0}{n_0 z_0}$  و TE و  $p_s = \frac{n_s \cos \theta_s}{z_0}$ 

ی برای موج TM داده می شوند. محیطهای  $p_s = \frac{\cos\theta_s}{n_s z_0}$  اول و آخر را خلا در نظر گرفتیم. بازتاب کل با رابطه زیر به دست می آید.

$$R = \left| r \right|^2 \tag{6}$$

#### ۳- نتايج و بحث

 $\varepsilon_a = 4$  (شیشه کوارتز) a (پارامترهای انتخابی برای لایه a $\varepsilon_b = 1$  (هوا) b و برای لایه  $d_a = 5mm$   $\mu_a = 1$ (پلاسما) p و براى لايه  $d_b = 5mm$  ،  $\mu_b = 1$  $n_{\rho} = n_1 = 1 \times 10^{19} m^{-3}$  $d_p = 1.0mm$  $v = 2\pi \times 10^6 \ r \ a \ ds$  ,  $\omega_p = 2\pi \times 28.4 \times 10^9 \ rad/s$ در نظر مى گيريم. ابتدا گاف باند بلور فوتونى پلاسمايى 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 می شود در ساختار دودورهای بزرگترین گاف باند فوتونی به دست میآید، کوچکترین گاف باند فوتونی نیز مربوط به شبه تناوب تو-مورس می-باشد. در هر چهار تناوب لبه های بالایی و پایینی گاف باند با افزایش زاویه به سمت فرکانس های بالاتر کشیده می شود که میزان این کشیدگی برای شبه تناوب دودوره-ای محسوس تر می باشد.



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  $d_b = 5mm \cdot d_p = 1mm$  ،  $d_a = 5mm$  (شکل۵۵ شبه تناوب دودوره ای، شکل۱۵ شبه تناوب تو-مورس، شکل۱۵ شبه تناوب فیبوناچی و شکل۱۵ 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 TT و TT 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 تمام زوایا و قطبش های TE و TMوضخامتهای شکل۱۵ شبهتناوب تو-مورس، شکل۱۵ شبهتناوب فیبوناچی و شکل۲۵ تناوب دوتایی)

پلاسمایی میباشد.

## مراجع

- 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 superconductor/dielectric. Im 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.

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<sub>e</sub> 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



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 TMوخخامتهای مام زوایا و قطبش های d<sub>b</sub> = 5mm، d<sub>p</sub> = 1mm، d<sub>a</sub> = 5mm دودوره ای، شکل ۱۵ شبهتناوب تو-مورس، شکل۱۰ شبهتناوب فیبوناچی و شکل۱۵ 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