

# اثر پارامترهای مختلف بر شدت جذب و نوار گاف بلور فوتونی پلاسمایی سه تایی با احتساب اثرات گرمایی و برخوردی پلازما

زینب رحمانی\*، ناهید رضایی

دانشگاه کاشان، دانشکده فیزیک، گروه لیزر و فتونیک

دریافت: ۹۹/۵/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۶/۲۳

## چکیده

در این مطالعه، انتشار امواج الکترومغناطیسی و ساختار نوار گاف در یک بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی سه تایی شامل پلاسمای برخوردی با در نظر گرفتن سرعت حرارتی الکترون‌ها بررسی شده است. هر سلول واحد ساختار متشکل از لایه‌های دی‌الکتریک I\_پلازما\_دی‌الکتریک II می‌باشد. پلازما نوعی ماده پاشنده است، یعنی ضریب شکست آن به فرکانس موج الکترومغناطیسی فرودی وابسته است. همین ویژگی، بلور فوتونی پلاسمایی را از سایر بلورهای فوتونی معمول متمایز می‌کند. در این مقاله با استفاده از روش ماتریس انتقال، شدت جذب و انعکاس امواج الکترومغناطیس با قطبش TE هنگامی که به طور عمود و مورب بر بلور فوتونی فرود می‌آید، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند با تغییر پارامترهای مختلف بلور فوتونی مانند ضخامت و دمای الکترونی لایه پلازما، ثابت دی‌الکتریک و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک، می‌توان پهنای، تعداد و محل نوارهای گاف را به صورت هدفمند تنظیم کرد و شدت جذب موج فرودی را کنترل کرد.

**واژگان کلیدی:** بلور فوتونی سه تایی، پلاسمای برخوردی، سرعت حرارتی الکترون، نوار گاف، جذب

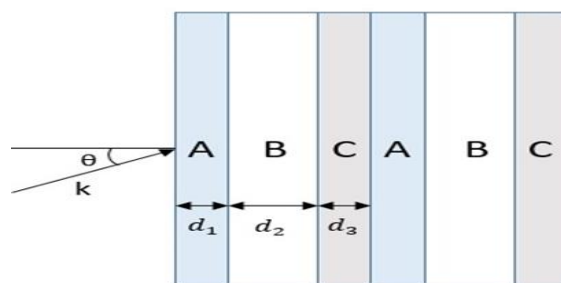
## مقدمه

بلور فوتونی را می‌توان یک محیط با خواص اپتیکی متناوب تعریف کرد که پاشنده است و میزان گذردهی و انعکاس آن به شدت وابسته به طول موج فرود است. مهمترین اثر ناشی از تناوب، وجود بازه‌هایی پیوسته و کراندار بسامدی است که در آنها امکان انتشار موج در ساختار وجود ندارد، به این نواحی گاف فوتونی یا نوار ممنوع بسامدی گفته می‌شود. معمولاً در طراحی هندسه‌های گوناگون بلورهای فوتونی، علاقمندیم ساختارهایی با عریض‌ترین پهنای نسبی گاف را به دست آوریم. دلیل علاقه به نوار گاف در بلورهای فوتونی، کاربردهای آن در زمینه‌های تحقیقاتی و فناوری مانند فیلترها، موجبرها، لیزرها، کلیدهای اپتیکی، کاواک‌ها و... است [۱-۵]. ساختارهای دارای نوار گاف فوتونی در فیبرهای نوری، سویچ‌ها و عناصر فعال

نوری که می‌توانند جایگزین عناصر فعال الکترونیکی شوند، کاربردهای بسیاری دارند. یکی از جالب‌ترین کاربردهای بلورهای فوتونی در ارتباطات فیبر نوری است. در این زمینه از ویژگی منحصر به فرد بلورهای فوتونی، یعنی انعکاس کامل نور هنگامی که فرکانس آن در محدوده گاف فوتونی است، استفاده می‌شود و در نتیجه تلفات در غلاف فیبر و اثرات غیرخطی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در ساخت موجبرهای نوری به عنوان یکی از مهم‌ترین المان‌های ادوات نوری، می‌توان از بلورهای فوتونی به منظور کاهش بازتاب و تلفات موجبر در خمیدگی‌های شدید و تزویج کاواک‌های تشدید استفاده کرد. در سال ۲۰۰۴ هوجو و ماز بلور فوتونی پلاسمایی را پیشنهاد دادند [۷]. بسیاری از محققان خواص پراکندگی و خواص اپتیکی بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی را بررسی کرده‌اند. مهم‌ترین ویژگی بلورهای فوتونی پلاسمایی، نوار گاف قابل تنظیم است که با پارامترهای پلاسما کنترل می‌شود [۷-۱۳]. در این تحقیق انتشار امواج الکترومغناطیس در یک بلور فوتونی پلاسمایی سه‌تایی با در نظر گرفتن برخورد و اثرات سرعت گرمایی الکترون‌های پلاسما مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. همچنین ضرایب جذب و انعکاس با تغییر پارامترهای ساختاری و پلاسمایی بلور فوتونی مورد نظر با کمک روش ماتریس انتقال محاسبه خواهد شد.

### تئوری و پیکربندی مسأله

ساختار مورد بررسی در کار حاضر همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل یک بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی سه‌تایی است که تحت تابش مایل موج الکترومغناطیسی با قطبش خطی قرار می‌گیرد. ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک I، پلاسما و دی‌الکتریک II به ترتیب  $d_1$ ،  $d_2$  و  $d_3$  در نظر گرفته می‌شود و ثابت‌های دی‌الکتریک لایه پلاسما و لایه‌های دی‌الکتریک I، II به ترتیب با  $\epsilon_p$ ،  $\epsilon_{d1}$  و  $\epsilon_{d2}$  مشخص می‌شوند.



شکل ۱: نمایی از فرود موج الکترومغناطیسی بر بلور فوتونی پلاسمایی یک بعدی سه‌تایی

لایه پلاسما در بلور فوتونی مورد بررسی همگن و همسانگرد فرض می‌شود که با در نظر گرفتن اثرات برخورد و سرعت حرارتی الکترون‌ها، ثابت دی‌الکتریک آن به صورت ذیل است [۱۴]:

$$\varepsilon_p = \frac{\left[ 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_e)} \right]}{\left[ 1 + \frac{\omega_p^2 \omega}{(\omega - i\nu_e)^3 \frac{T_e}{m_e c^2}} \right]} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\omega$  فرکانس موج،  $c$  سرعت نور در خلأ،  $T_e$  دمای الکترون و  $\nu_e$  فرکانس برخورد الکترون‌ها است. همچنین فرکانس پلاسما  $\omega_p = (n_e e^2 / \varepsilon_0 m_e)^{1/2}$  می‌باشد که  $n_e$  و  $m_e$  به ترتیب معرف چگالی تعداد الکترون‌ها در پلاسما و جرم سکون الکترون است. با توجه به این که یون‌های موجود در پلاسما، جرمی بسیار بزرگ‌تر از الکترون‌ها دارند که منجر به تحرک بسیار پایین‌تر آنها نسبت به الکترون‌ها می‌شود، نمی‌توانند به امواج فرکانس بالای منتشر شده در پلاسما پاسخ دهند. بنابراین از اثر یون‌ها در گذردهی دی‌الکتریک پلاسما چشم‌پوشی می‌شود و نقش آنها صرفاً فراهم نمودن شرط شبه‌خنثایی در پلاسماست. در این کار از روش ماتریس انتقال که شیوه‌ای شناخته شده در محاسبات و تحلیل ساختار باند، ضرایب انتقال و بازتاب طیف بلور فوتونی است، استفاده می‌شود. ماتریس انتقال برای هر لایه از بلور فوتونی به شرح زیر است [۱۶-۱۵]:

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix}, \quad j = A, B, C \quad (2)$$

که  $C, B, A$  به ترتیب مربوط به لایه دی‌الکتریک I، پلاسما و دی‌الکتریک II، است.  $\delta_j$  ثابت فاز انتشار در لایه  $j$ ام بصورت تابعی از زاویه فرود موج  $\theta$ ، تراوایی مغناطیسی و گذردهی الکتریکی  $\mu_j$ ،  $\varepsilon_j$  می‌باشد:

$$\delta_j = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_j} \sqrt{\mu_j} d_j \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j} \quad (3)$$

همچنین برای موج با قطبش TE امپدانس مشخصه،  $\eta_j$  بصورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\eta_j = \frac{\sqrt{\varepsilon_j}}{\sqrt{\mu_j}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta / \varepsilon_j \mu_j} \quad (4)$$

با استفاده از رابطه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی لایه  $n$  ام و  $(n+1)$  ام به وسیله ماتریس انتقال  $\begin{pmatrix} E_n \\ H_n \end{pmatrix}$  می‌توان رابطه بین لایه‌های اول و آخر را بدست آورد:

$$M_n \begin{pmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{n+1} \\ H_{n+1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ماتریس انتقال از طریق روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد. ضریب انعکاس  $r$  و ضریب عبور  $t$  با استفاده از عناصر  $M = \prod_{j=1}^n M_j$  عناصر ماتریس  $m_{22}$  و  $m_{21}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{11}$

$$r = \frac{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{n+1} - m_{21} + m_{22}\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{n+1} + m_{21} + m_{22}\eta_0} \quad (6)$$

$$t = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{n+1} + m_{21} + m_{22}\eta_0} \quad (7)$$

$\eta_0$  و  $\eta_{n+1}$  مربوط به محیط‌های اول و آخر هستند که در این مطالعه خلأ در نظر گرفته شده و بنابراین  $\eta_0 = \eta_{n+1} = \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\mu_0}} \sqrt{1 - (\sin^2 \theta / \epsilon_0 \mu_0)}$  است. در نهایت شدت‌های عبور، انعکاس و جذب موج الکترومغناطیس با استفاده روابط زیر تعیین می‌شوند.

$$R = |r|^2, \quad T = |t|^2, \quad A = 1 - R - T \quad (8)$$

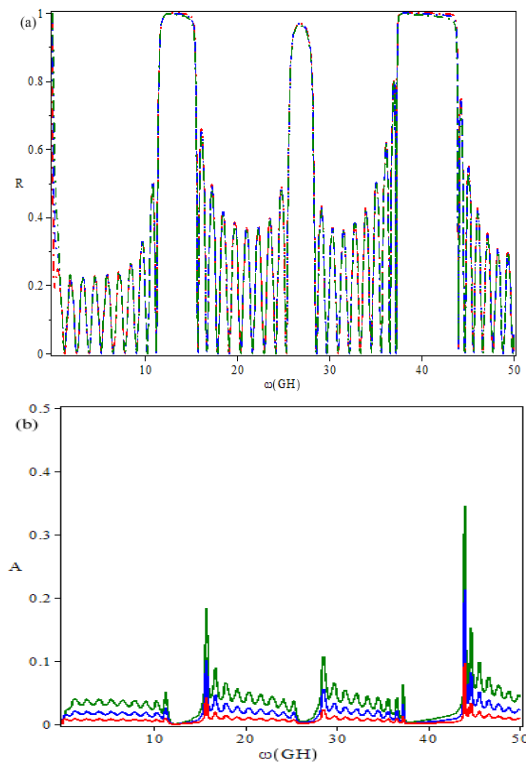
### شبیه‌سازی عددی و بحث

در این بخش، نتایج حل عددی معادله (۸) برای انعکاس و جذب موج فرودی TE توسط یک بلور فوتونی پلاسمایی شامل پلاسمای برخوردی با در نظر گرفتن اثرات حرارتی الکترون‌ها ارائه شده است. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف بر نوارهای فوتونی بررسی شده است. پارامترها عبارتند از:

$$\epsilon_{d1} = 2.1, \epsilon_{d2} = 4.2, d_1 = d_3 = 3mm, d_2 = 0.8mm, \omega_p = 600GHz, N = 10$$

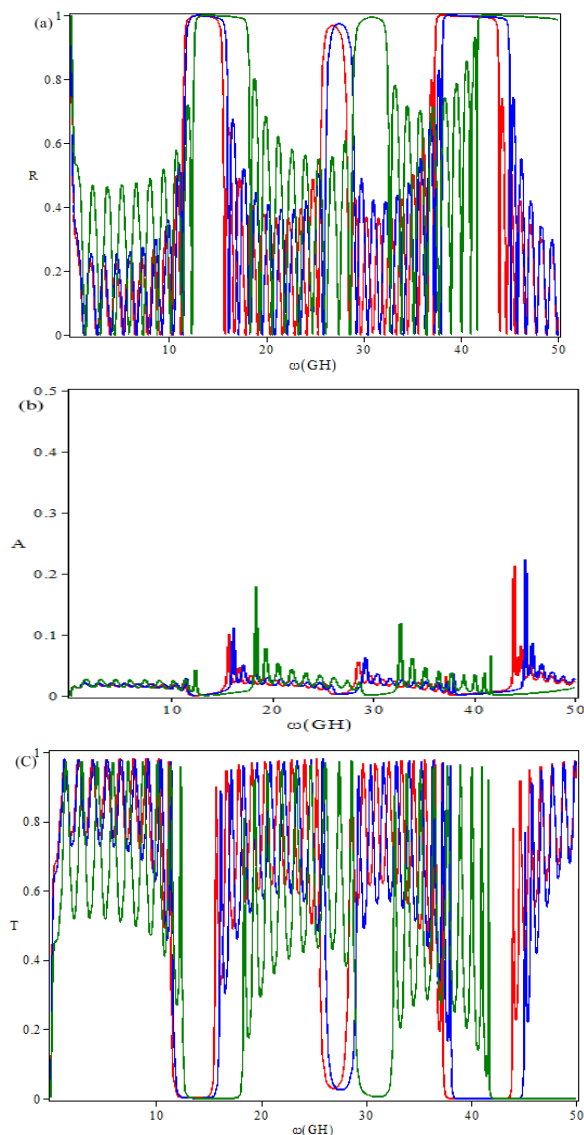
که فرکانس برخورد و انرژی جنبشی الکترونی بهنجار شده به ترتیب با عبارات  $\tau = \frac{T_e}{mc^2}$ ,  $\vartheta = \frac{v_e}{\omega_p}$  تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است لایه‌های پلاسمای به کار رفته در ساختار حاضر در تقریب سرد یا غیرتعادلی در نظر گرفته شده و صرفاً اثرات دمای الکترونی و حرکات گرمایی آنها در پاشندگی انرژی موج فرودی و جذب موج بررسی می‌شود و این مسأله به هیچ عنوان مترادف با در نظر گرفتن پلاسمای گرم یا تعادلی (که در آن الکترون‌ها و یون‌ها هم‌دم هستند و معمولاً در رژیم آرک یا قوسی تخلیه الکتریکی رخ می‌دهد)، نمی‌باشد.

در شکل ۲، اثر دمای الکترونی بر شدت جذب و نوار گاف بلور فوتونی پلاسمایی نشان داده شده است. بر اساس دماهای جنبشی الکترونی پلازما در رفرنس [۱۴-۱۷] منحنی‌های انعکاس و جذب در  $\tau = 0, 0.02, 0.05, 0.1$  ترسیم شده است که به ترتیب با رنگ‌های قرمز، آبی و سبز مشخص می‌شوند. همان‌طور که مشهود است، با افزایش دما، تغییر قابل توجهی در نوار گاف مشاهده نمی‌شود، اما شدت جذب افزایش می‌یابد. افزایش سرعت حرارتی الکترون‌ها باعث برخورد‌های تصادفی پی در پی بین ذرات در پلازما شده و در نتیجه منجر به افزایش اثرات اتلافی می‌شود.



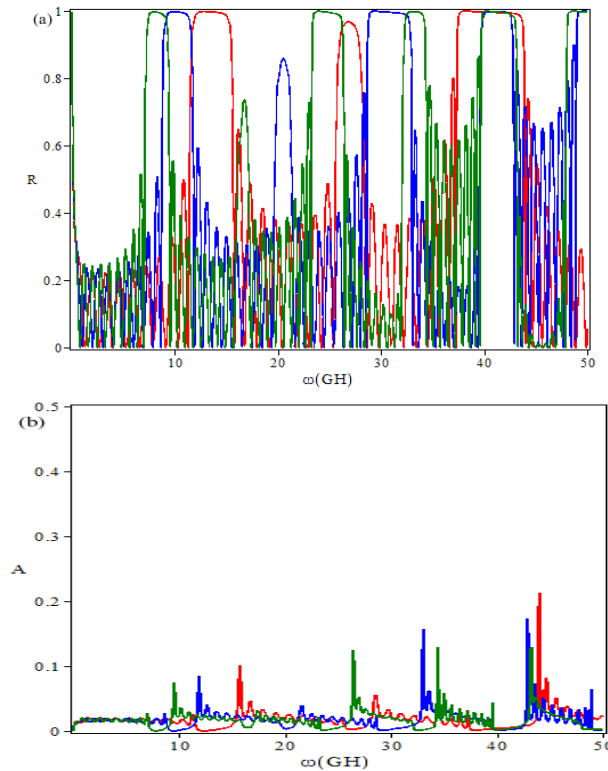
شکل ۲. اثر دماهای متفاوت الکترونی لایه‌های پلازما بر (a) انعکاس و (b) جذب در  $\tau = 0, 0.02$  (قرمز)،  $0.05$  (آبی)،  $0.1$  (سبز)

تأثیر زاویه فرود موج الکترومغناطیسی بر جذب و انعکاس در شکل ۳ بررسی شده است. شکل‌های 3(a)، 3(b) و 3(c) به ترتیب نمایانگر شدت‌های انعکاس، جذب و عبور موج از بلور فوتونی هستند. در این‌جا  $\theta = 0.03$ ،  $\tau = 0.005$  و زاویه‌ای فرود عبارتند از  $\theta = 0^\circ$ ،  $\theta = 20^\circ$  و  $\theta = 50^\circ$ . شکل 3(a) نشان می‌دهد که با افزایش زاویه فرود به  $\theta = 20^\circ$  و  $\theta = 50^\circ$ ، پهنای نوار گاف و شدت قله‌های جذب افزایش می‌یابد و به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود.



شکل ۳. اثر زوایای فرود متفاوت بر (a) انعکاس، (b) جذب و (c) عبور برای  $\theta = 0^\circ$  (قرمز)،  $\theta = 20^\circ$  (آبی)،  $\theta = 50^\circ$  (سبز)

با مقایسه منحنی‌های رسم شده در شکل ۴ می‌توان اثر فاکتور اشغال (نسبت ضخامت پلازما به ضخامت دی‌الکتریک) را برای پارامترهای  $\tau = 0.005$  و  $\vartheta = 0.03$  مشاهده کرد. در شکل (a) نشان داده شده است که با افزایش ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک از 3mm به 4mm و 5mm و در نتیجه کاهش فاکتور اشغال، پهنای نوارهای گاف تقریباً کاهش و تعدادشان افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ساختار نوار گاف با افزایش ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک به سمت فرکانس‌های پایین‌تر منتقل شده است. همان‌طور که در شکل (b) مشاهده می‌شود، با کاهش فاکتور اشغال، شدت قله‌های جذب کاهش درحالی‌که تعداد آنها افزایش می‌یابد.



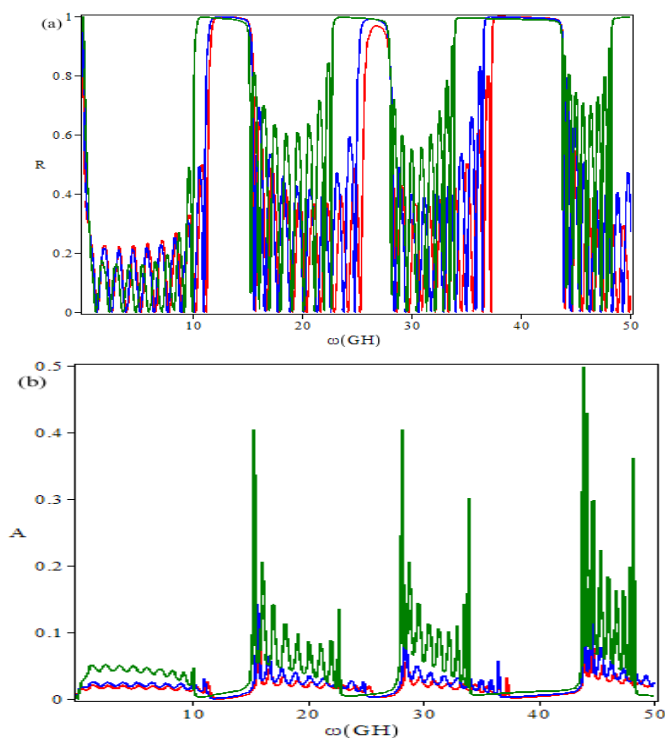
شکل ۴. اثر ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک بر (a) انعکاس و (b) جذب برای  $d_1 = d_3 = 3\text{mm}$  (قرمز)،  $4\text{mm}$  (آبی)،  $5\text{mm}$  (سبز)

در شکل (a) نشان داده شده است با تغییر ضخامت لایه پلاسما از  $0.8\text{mm}$  به  $1\text{mm}$  و  $2\text{mm}$ ، پهنای نوارهای گاف افزایش می‌یابد اما تعداد آنها تغییر نمی‌کند. در توضیح این پدیده لازم است به پارامتر عمق پوسته یا عمق نفوذ در پلاسما اشاره کنیم. عمق نفوذ لایه پلاسما ( $\delta$ ) یعنی طولی که طی آن دامنه موج به  $1/e$  مقدار اولیه‌اش تقلیل می‌یابد، تابع پارامترهای پلاسما و فرکانس موج فرودی است و از بخش موهومی ثابت انتشار به صورت  $\delta = \frac{-1}{\text{Im}(k)}$  به دست می‌آید. ثابت انتشار  $k$  در محیط پلاسمای همسانگرد با گذردهی دی‌الکتریک  $\epsilon_p$  از فرمول ذیل محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_p} \quad (9)$$

طبق رابطه بالا در پلاسمایی با فرکانس پلاسمایی  $600\text{GHz}$ ، انرژی گرمایی الکترون  $\frac{T_e}{m_e c^2} = 0.01$ ، فرکانس برخورد  $\nu_e = 0.03\omega_p$  به کار رفته در ساختار مورد نظر، عمق نفوذ موج فرودی با فرکانس  $\omega = 10\text{GHz}$  برابر  $\delta = 0.83\text{mm}$  می‌باشد و با افزایش  $\omega$ ، عمق نفوذ کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش ضخامت لایه‌های پلاسما به دلیل چگالی بالای آن‌ها، موج در عبور از پلاسما با افت شدید دامنه مواجه می‌شود و بنابراین انتشار موج از طریق بلور فوتونی سخت‌تر و پهنای باندهای بازتاب

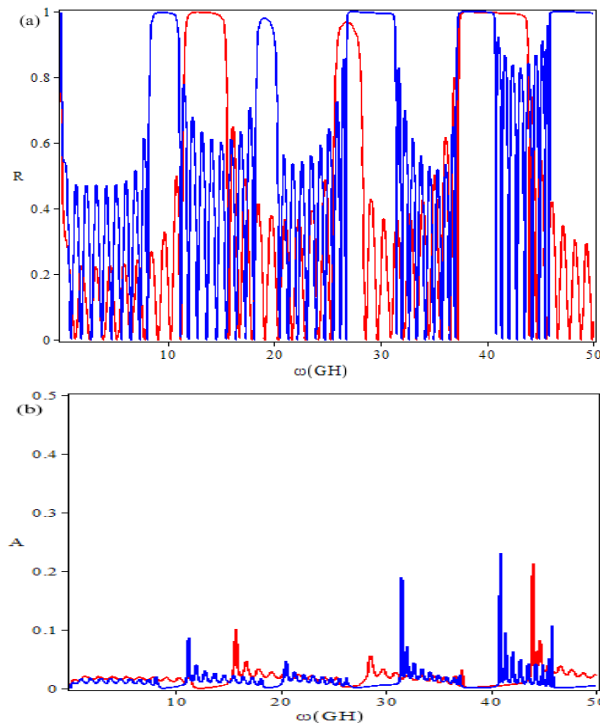
گسترده‌تر می‌شوند. همچنین در شکل (b) با افزایش ضخامت لایه پلاسمای قله‌های جذب به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است که این امر ناشی از وجود پلاسمای برخوردی است و بنابراین با افزایش فاکتور اشغال، اثر جذب ناشی از اتلافات برخوردی و حرکت حرارتی الکترونی در پلاسمای افزایش می‌یابد [۱۸-۱۹].



شکل ۵. اثر ضخامت لایه پلاسمای بر (a) انعکاس و (b) جذب برای  $d_2 = 0.8\text{mm}$  (قرمز)،  $1\text{mm}$  (آبی)،  $2\text{mm}$  (سبز)

سرانجام در شکل (a) و (b)، منحنی‌های انعکاس و جذب برای ثابت‌های دی‌الکتریک  $\epsilon_{d1} = 2.1$ ،  $\epsilon_{d2} = 4.2$  و  $\epsilon_{d1} = 4.2$ ،  $\epsilon_{d2} = 8$  ترسیم شده‌اند. لازم به ذکر است گذردهی نسبی  $\epsilon_d = 2.1$  مربوط به تفلون (Teflon)،  $\epsilon_d = 4.2$  مربوط به دی‌الکتریک میکا (Mica) و برای لایه‌ای از جنس شیشه (glass) ثابت دی‌الکتریک  $\epsilon_d = 8$  در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، افزایش ثابت دی‌الکتریک، منجر به کاهش پهنای نوار گاف و افزایش تعداد آنها می‌شود که دلیل آن اختلاف بیش‌تر بین گذردهی پلاسمای و دی‌الکتریک و در نتیجه، ظاهر شدن نواحی عبور و انعکاس بیش‌تر است. علاوه بر این، ساختار نوار گاف با افزایش ضریب گذردهی لایه دی‌الکتریک به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر می‌کند. همچنین در شکل (b) با افزایش ثابت دی‌الکتریک، شدت جذب افزایش می‌یابد.





شکل ۶. اثر گذردهی نسبی لایه‌های دی‌الکتریک بر (a) انعکاس و (b) جذب برای  $\epsilon_{d1} = 2.1$  (قرمز)،  $\epsilon_{d1} = 8$  (آبی)،  $\epsilon_{d2} = 4.2$

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق، انتشار امواج الکترومغناطیسی قطبیده خطی در ساختار دوره‌ای منظم (بلور فوتونی) بررسی شد. یک بلور فوتونی یک‌بعدی سه‌تایی شامل دو لایه دی‌الکتریک متفاوت و لایه پلاسمای برخوردی با اتلافات گرمایی، دارای آرایش دی‌الکتریک I-پلاسمای-دی‌الکتریک II مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تأثیر پارامترهای موج فرودی مانند زاویه فرود و فرکانس موج برای امواج TE بررسی شد. از طرف دیگر، تأثیر پارامترهای پلاسمای و ساختار بلور فوتونی مانند دمای الکترونی، فرکانس پلاسمای و ضخامت لایه پلاسمای، ثابت دی‌الکتریک و ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک بر نوار گاف فوتونی و جذب تعیین شد. مشاهده شد که با افزایش دمای الکترون پلاسمای، جذب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش زاویه فرود باعث افزایش قله‌های جذب و افزایش پهنای نوار گاف می‌شود. نشان دادیم با افزایش ضخامت لایه‌های دی‌الکتریک، پهنای نوارهای گاف کاهش یافته و قدرت جذب افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش ضخامت لایه پلاسمای، شدت بیشینه‌های جذب و پهنای نوارهای گاف بدون تغییر در تعداد آنها، افزایش می‌یابند. سرانجام، تأثیر ثابت دی‌الکتریک لایه‌های دی‌الکتریک بر انعکاس و جذب بررسی شد. مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر شدت انعکاس و جذب در بلور فوتونی مورد نظر نشان داد که می‌توان با تغییر فاکتورهای مختلف، انعکاس و نوار گاف فوتونی را به صورت قابل کنترل تغییر داد.

## منابع

1. L Ren, Y Li, N Li, C Chen *Crystals* 9 57 (2019)
2. M.R.J Azizpour, M Soroosh, N Dalvand, Y Seifi-Kavian *Crystals*. 9 461 (2019)
3. N.N Huang, Y.C Chung, H.T Chiu, J.C Hsu, Y.F Lin, C.T Kuo, Y.W Chang, C.Y Chen, T.R Lin, *Crystals*. 10 421 (2020)
4. A Y Herrera, J M Calero, N Porrás-Montenegro *Journal of Applied Physics*. 123 033101 (2018)
5. H Francis, S Chen, K.J Che, M Hopkinson, C. Y Jin *Crystals*. 9 493 (2019)
6. H Hojo, A Mase *J. Plasma Fusion Res.* 80 89 (2004)
7. J Yao, et al *AIP Advances*. 9 065302 (2019)
8. H F Zhang, Y Ma, W Y Li, T Liu *Physics of Plasmas*. 26 012112 (2019)
9. H Tan, Ch Jin, L Zhuge, X Wu *Physics of Plasmas*. 26 052107 (2019)
10. H Tan, et al *IEEE Transactions on Plasma Science*. 46 539 (2018)
11. J Trieschmann, T Mussenbrock *Journal of Applied Physics*. 124 173302 (2018)
12. F Xue, et al *Optical and Quantum Electronics*. 49 19 (2017)
13. Z Rahmani, N Rezaee *Optik*. 184 134 (2019)
14. M R Jafari Milani, A R Niknam, A H Farahbod *physics of plasmas*. 21 063107 (2014)
15. H Wang, Y P Li *Acta Phys. Sin.* 50 2177-2178(2001)
16. X K Kong, S B Liu, H F Zhang, C Z Li, B R Bian *J. Opt.* 13 035101 (2011)
17. L Rajaei, S Mirabotalebi, B Shokri, *Phys. Scr.* 84 015506 (2011)
18. J D Joannopoulos, S G Johnson, J N Winn, R D. Meade, Photonic crystals: molding the flow of light, Second Edition, Princeton University Press (2008)
19. N A Krall and A W Trivelpiece, "Principles of Plasma Physics," McGraw-Hill, New York (1973)