

مطالعه اثر حضور لایه پلاسمای همگن برخوردی روی خواص نوری بلور فوتونی

فرزانه برنجی*، عبدالرسول اسفندیاری، لیا شاه رسائی، و سیما علیلو

دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز

پست الکترونیکی: farzanehberenji@phd.tabrizu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰)

چکیده:

بلورهای فوتونی پلاسمایی ساختارهایی هستند که در آن‌ها ترکیبی از مواد دی‌الکتریک و پلاسما به طور متناوب آرایش یافته‌اند، پلاسما با داشتن بسامد پلاسمایی و طول دبای مشخص، رفتار موج‌های الکترومغناطیسی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. در تحلیل انتشار امواج در پلاسما، وارد کردن برخوردها ضروری است زیرا پلاسماهای واقعی همواره شامل برهم‌کنش‌های الکترون-یون و الکترون-خشتی هستند. این برخوردها عامل اصلی مقاومت مؤثر الکترون‌ها در برابر نوسان میدان هستند و بنابراین تعیین می‌کنند پلاسما چه مقدار از انرژی موج را عبور، جذب یا بازتاب کند. در این مقاله، انتقال موج از طریق ساختارهای فوتونی یک‌بعدی با لایه‌های Si/SiO_2 و یک لایه پلاسما با استفاده از روش ماتریس انتقال و شبیه‌سازی‌های دقیق، بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که با افزایش چگالی پلاسما، مدهای نقص به سمت بسامدهای بالاتر جابه‌جا می‌شوند، در حالی که افزایش ضخامت لایه پلاسما باعث جابه‌جایی این مدها به سمت بسامدهای پایین‌تر می‌شود. همچنین، افزایش بسامد برخورد الکترون‌ها باعث میرایی موج، کاهش شدت عبور و پهن‌تر شدن قله‌های تشدید می‌شود. کنترل دقیق پارامترهای پلاسما و طراحی ساختار فوتونی ابزار قدرتمندی برای ایجاد صافی‌ها و حسگرها با مشخصات تشدید قابل تنظیم است.

واژه‌های کلیدی: بلور فوتونی، پلاسما، لایه نقص، عبور، ماتریس انتقال، بسامد الکترونی پلاسما

۱. مقدمه

بلورهای فوتونی مواد ویژه‌ای هستند که می‌توانند نور را در محدوده طول موج‌های خاصی بازتاب یا محبوس کنند. این ساختار، از شبکه‌ای از مواد دی‌الکتریک با ضریب شکست متفاوت تشکیل شده است که به صورت متناوب آرایش یافته‌اند [۳-۱]. این تناوب باعث ایجاد نواحی ممنوعه یا گاف نواری برای امواج الکترومغناطیسی می‌شود [۴]. این گاف‌های فوتونی باعث می‌شوند که موج‌های الکترومغناطیسی با بسامدهای درون این گاف‌ها اجازه انتشار نداشته و میدان آن‌ها میرا شود. موقعیت بسامدی مد نقص در داخل نوار گاف بستگی به نوع و ویژگی‌های نقص دارد. برای مثال، تغییر در ضریب شکست یا

ضخامت لایه نقص می‌تواند محل مد نقص را در نوار گاف به جلو یا عقب جابه‌جا کند. امروزه این گاف نواری در کاربردهای مختلفی مانند لایه‌نشانی با بازتابندگی بالا برای افزایش بازده دیودها و آینه‌های با بازتابندگی بالا در کاواک‌های لیزری استفاده می‌شوند [۵]. این ویژگی‌ها به طراحان امکان می‌دهد تا رفتار نور را به دقت مهندسی کرده و پاسخ‌های اپتیکی دلخواه ایجاد کنند [۶-۱۱]. بلورهای فوتونی به دلیل کاربردهای متنوع در سامانه‌های ارتباطات اپتیکی، توجه زیادی را از جنبه‌های نظری و تجربی به خود جلب کرده‌اند. اخیراً، معرفی لایه‌های تخلیه پلاسما در این بلورها منجر به ایجاد ساختار جدیدی به نام بلورهای فوتونی پلاسما شده است که از ترکیب متناوب پلاسما و مواد دی‌الکتریک تشکیل شده‌اند [۱۲-۱۶].

ثابت دی الکتریک به صورت پیچیده ظاهر می شود. حذف برخورد ها عملاً پلاسما را به یک محیط آرمانی و بدون میرایی تبدیل می کند که با رفتار واقعی پلاسما ناسازگار است. از دیدگاه فیزیکی، حضور برخورد ها تعیین می کند که چه میزان از انرژی موج در حین نوسان در محیط باقی بماند و چه مقدار از آن به صورت حرارت یا اتلاف گسیل می شود، و همین مسئله شکل گیری تشدید و محل دقیق آن را تحت تأثیر قرار می دهد. افزون بر این، برخوردها نقش مستقیمی در تعیین پهنای طیفی و کیفیت تشدید دارند.

۲. معادلات اساسی و روش ماتریس انتقال

هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی را بر یک ساختار متناوبی از لایه ها تابیده می شود، می توان با استفاده از معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی در مرز میان لایه ها، ضرایب دامنه امواج تابشی و بازتابی در هر لایه را به یکدیگر مرتبط کرد. این ارتباط با استفاده از ماتریس انتقال هر لایه برقرار می شود. دامنه امواج تابشی و بازتابی ورودی و خروجی به وسیله ماتریس انتقال کل ساختار به یکدیگر مرتبط می شوند. این ماتریس از حاصل ضرب ماتریس های انتقال مربوط به تک تک لایه ها به دست می آید. در این مقاله، یک ساختار بلور فوتونی با لایه نقص پلاسمای همگن به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۲۲]:

$$(SiO_2 / Si)^L / Plasma / (SiO_2 / Si)^L \quad (1)$$

در این رابطه، L تعداد لایه ها در دو طرف لایه نقص است. Si لایه سیلیکون و SiO_2 لایه سیلیکون دی اکسید، و پلاسما لایه نقص بلور فوتونی است. شکل ۱، ساختار بلور فوتونی را نشان می دهد.

ضریب شکست ساختار به صورت زیر تعریف می شود [۲۳]:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2)$$

که بسامد پلاسما به صورت رابطه زیر داده می شود:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_r}} \quad (3)$$

بلورهای فوتونی یک بعدی به صورت ساختارهای متناوب چندلایه مشابه آینه های براگ مورد بررسی قرار گرفته اند. این ساختارها دارای یک گاف نواری یک بعدی با محدوده ای از طیف با بازتابندگی بالا را تشکیل می دهند. این ایده با هدف کنترل خواص نسی مواد و بهبود مکان یابی فوتون ها ارائه شده و بر اساس طراحی مواد با فاصله نواری مایل پایه گذاری شده است [۱۷-۲۰]. ایده بلورهای فوتونی پلاسما به عنوان یک پیشرفت مهم در علم فوتونیک شناخته می شود. این مفهوم با استفاده از ویژگی های منحصر به فرد پلاسما، نویدبخش توسعه فناوری های جدید در زمینه های مختلفی از جمله ارتباطات نوری، حسگری و صافی های نوری است. با ادامه تحقیقات در این زمینه، انتظار می رود که بلورهای فوتونی با لایه نقص پلاسما به عنوان یک ابزار کلیدی در توسعه فناوری های پیشرفته نوری شناخته شوند [۲۱]. در این مقاله، انتقال موج از طریق ساختارهای فوتونی یک بعدی با لایه های Si/SiO_2 و یک لایه پلاسما به عنوان نقص، با استفاده از روش ماتریس انتقال و شبیه سازی های دقیق، بررسی شده است. تمرکز اصلی بر تأثیر چگالی الکترونی پلاسما و بسامد برخورد الکترون ها و ضخامت لایه پلاسما بر رفتار تشدید موج ها است. بدین منظور، نمودارهای ضریب عبور بر حسب بسامد برای مقادیر مختلف چگالی ها، ضخامت ها، و بسامدهای برخورد رسم شده اند. همچنین، نمودارهای ضریب کیفیت^۱ ($Q-factor = f / FWHM$) و ضریب عملکرد ($FOM = Q / FWHM$)^۲ بر حسب چگالی ها و ضخامت های مختلف پلاسما رسم شده اند، که در آن ها $FWHM$ ^۳ پهنای نیمه بیشینه و f بسامد تشدید است.

برخوردها نقش مهمی را در داخل پلاسما ایفا می کنند. پلاسماهای واقعی همواره شامل برهم کنش های الکترون-یون و الکترون-خشی هستند. این برهم کنش ها باعث می شود که نوسان الکترون ها نسبت به میدان الکترومغناطیسی کاملاً بدون اتلاف نباشد؛ در نتیجه مؤلفه موهومی قطبش افزایش یافته و

۱. Quality Factor

۲. Figure of Merit

۳. Full Width at Half Maximum



شکل ۱. ساختار بلور فوتونی با لایه پلاسمای همگن برخوردی به عنوان لایه نقص.

به کاررفته در شبیه سازی، $\nu = 4\pi \times 10^7 \text{ Hz}$ و $n_e = 8 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ ، در روابط بالا و با فرض $\ln \Lambda \approx 10$ به عنوان مقدار معمول برای پلاسمای آزمایشگاهی، دمای الکترونی در محدوده ۲ تا ۵ الکترون ولت تخمین زده می شود. این بازه دمایی کاملاً با رژیم پلاسمای سرد در کاربردهای تخلیه الکتریکی و صافی های نوری مطابقت دارد. همچنین، در این محدوده دمایی، شرط $\nu_{\text{phase}} \gg \nu_{\text{th,e}}$ برای امواج در بازه بسامدی گیگاهرتز برقرار بوده و مدل درود از اعتبار کافی برخوردار است. ماتریس انتقال برای لایه های دی الکتریک (Si , SiO_2) برابر است با:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_i d_i) & \frac{j}{\eta_i} \sin(k_i d_i) \\ j\eta_i \sin(k_i d_i) & \cos(k_i d_i) \end{pmatrix} \quad (i = \text{Si}, \text{SiO}_2, \text{Plasma}) \quad (V)$$

که در آن، $k_i = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_i}$ عدد موج، ω بسامد موج، c سرعت نور، و $\eta_i = \eta_e / \sqrt{\epsilon_i} = \sqrt{\frac{\mu_e}{\epsilon_i}} / \sqrt{\epsilon_i}$ است. با در نظر گرفتن تابش عمود ($\theta_i = 0$)، ماتریس انتقال برای لایه های بلور فوتونی به صورت زیر به دست می آید [۲۵]:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = (M_{\text{SiO}_2} M_{\text{Si}})^L M_c (M_{\text{SiO}_2} M_{\text{Si}})^L \quad (A)$$

که در آن، M_{SiO_2} , M_{Si} , M_c به ترتیب نشان دهنده ماتریس های مشخصه برای لایه های پلاسمای، سیلیکون و سیلیکون دی اکسید هستند. ماتریس مشخصه مربوط به لایه پلاسمای به صورت زیر است [۲۶]:

$$M_c = \begin{pmatrix} \cos(k_c d_c) & j/\eta_c(k_c d_c) \\ j\eta_c \sin(k_c d_c) & \cos(k_c d_c) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu_e}{\epsilon_e}} / \sqrt{\epsilon_r}, k_c = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r} \quad (10)$$

برای بلور فوتونی ضریب عبور برحسب عناصر ماتریس (۴) به صورت زیر بیان می شود:

در این رابطه، n_e چگالی الکترون، e بارالکترون، m_e جرم الکترون، ϵ_e گذردهی دی الکتریک در خلأ است. در این حالت تانسور دی الکتریک به یک کمیت نرده ای تبدیل می شود و ضریب دی الکتریک به صورت زیر به دست می آید:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (4)$$

این رابطه برای حالت بدون برخورد، $\nu_e = 0$ ، است. در ادامه نوع برخورد در نظر گرفته شده از نوع الکترون-خنثی است. پلاسمای مورد استفاده در این شبیه سازی، از نوع پلاسمای سرد با درجه یونش پایین است. در چنین پلاسمایی، چگالی ذرات خنثی (n_n) بسیار بیشتر از چگالی الکترون ها (n_e) و یون ها (n_i) است. در این شرایط، فراوان ترین نوع برخوردی که الکترون ها تجربه می کنند، برخورد با اتم ها یا مولکول های خنثی گاز زمینه است. برای پلاسمای برخوردی در غیاب میدان مغناطیسی، ضریب دی الکتریک به شکل زیر است [۲۴]:

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\nu_e)} \quad (5)$$

که در آن ω_p بسامد پلاسمای، ν_e بسامد برخورد و ω بسامد موج است. اگرچه دمای الکترونی (T_e) به عنوان یک پارامتر مستقل در معادلات ظاهر نشده است، اما ارتباط ذاتی آن با بسامد برخورد (ν) مورد استفاده با شبیه سازی قابل استنباط است. در فیزیک پلاسمای، بسامد برخورد الکترون-یون، که در پلاسمای ضعیف یونیده غالب است، تابعی از دما و چگالی است و توسط رابطه زیر توصیف می شود:

$$\nu_{ei} \approx n_i \sigma_{ei} \nu_{th,e} \ln \Lambda \approx 2.9 \times 10^{-7} n_e T_e^{-2/2} \ln \Lambda (\text{Hz}) \quad (6)$$

که در آن $\nu_{th} = \sqrt{\frac{\lambda k_B T_e}{\pi m_e}}$ سرعت گرمایی الکترون ها، n_e چگالی الکترونی، T_e دمای الکترون بر حسب الکترون ولت، و $\ln \Lambda$ لگاریتم کولنی است. با قرار دادن مقادیر عددی

و کاهش عبور در نواحی دیگر می‌شود، زیرا پلاسما رفتار دی‌الکتریک مؤثر ساختار را تغییر داده و در نتیجه موقعیت گاف‌های نواری نیز جابه‌جا می‌شود.

در این بخش تاثیر بسامد برخورد بر قله‌های عبور برای مقادیر مختلف آن روی بلور فوتونی در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بسامد برخورد باعث می‌شود که ضریب شکست پلاسما دارای بخش موهومی شود. با افزایش بسامد برخورد، بسامد تشدید به سمت مقادیر پایین جابه‌جا شده و اتلاف موج در محیط افزایش می‌یابد. در این شرایط، موج با برخوردهای بیشتری مواجه می‌شود، و انرژی موج به جنبش الکترون‌ها منتقل می‌شود؛ در نتیجه، دامنه موج عبوری کاهش می‌یابد. این موضوع موجب کاهش میزان عبور و افزایش پهنای تشدید و در نهایت کاهش ضریب کیفیت می‌شود. از سوی دیگر، به دلیل تغییر خواص پلاسما بسامد تشدید نیز دچار جابه‌جایی می‌شود. در بسامدهای برخورد پایین، پلاسما رفتار نزدیک‌تری به یک دی‌الکتریک با شفافیت بیشتر دارد، به دلیل آن‌که قله‌ها پهن‌تر شده‌اند و حساسیت به تغییرات ضریب شکست کاهش می‌یابد. بنابراین، برای کاربردهایی مانند حسگرهای نوری، بسامد برخورد پایین و میرایی کم شرایط مطلوب‌تری ایجاد می‌کنند.

در شکل ۳، چگالی پلاسما تغییر داده شده است، درحالی‌که ضخامت لایه نقص ثابت است. این شکل نشان می‌دهد که چگونه چگالی پلاسما بر طیف عبور ساختار بلور فوتونی تاثیر می‌گذارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی دی‌الکتریک لایه پلاسما افزایش یافته و بنابراین ضریب شکست پلاسما نیز بیشتر می‌شود. در نتیجه طول موج تشدید قله افزایش می‌یابد، که به معنی جابه‌جایی به سمت بسامدهای بالاتر است. هرچه چگالی الکترونی بیشتر می‌شود، قله عبور به سمت راست حرکت کرده و اندکی باریک‌تر اما کم‌ارتفاع‌تر می‌شود. این موضوع ناشی از تغییرات ثابت دی‌الکتریک پلاسما است، که به چگالی و بسامد مؤثر برخوردها وابسته است، و تعیین می‌کند موج در چه بسامدی بیشترین عبور را داشته باشد. نقش برخوردها در این نمودار بسیار کلیدی است، وجود برخورد الکترون-خنثی یا الکترون-یون باعث ایجاد میرایی در

$$t = \frac{2\eta_i}{m_1\eta_i + m_2\eta_i^* + m_1 + m_2\eta_i} \quad (11)$$

با توجه به این‌که محیط بیرونی هوا در نظر گرفته شده است، ضریب عبور را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$T = |t|^2 \quad (12)$$

۳. نتایج عددی

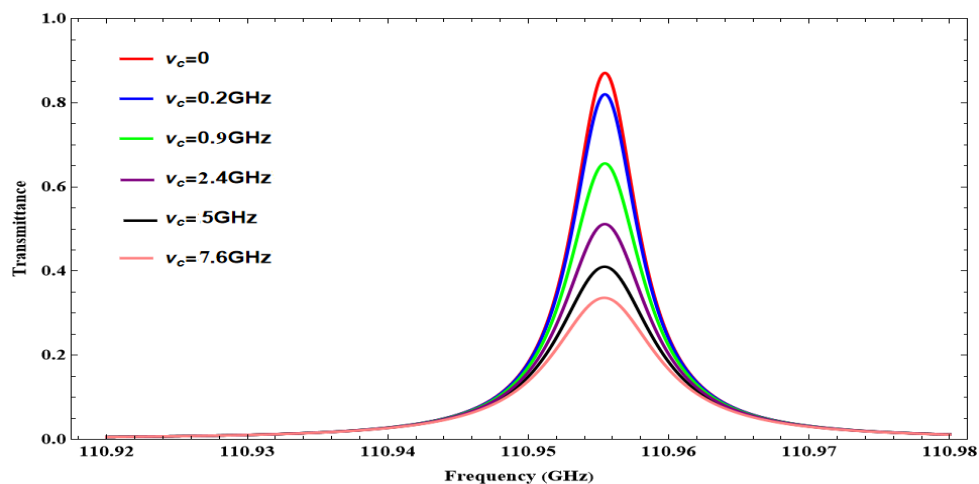
در ساختار بلور فوتونی لایه پلاسما همگن به عنوان لایه نقص در ساختار بلور فوتونی در نظر گرفته شده است. تعداد لایه‌های اطراف لایه نقص $L=4$ است، ضخامت و ضریب شکست لایه‌های Si, SiO_2 ثابت فرض شده‌اند. درحالی‌که، چگالی پلاسما و ضخامت لایه نقص پلاسما به عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته می‌شود، محیط اطراف نیز هوا فرض شده است. ضریب شکست Si, SiO_2 به ترتیب برابر با $n_{Si} = 3/4, n_{SiO_2} = 1/46$ است. ضخامت لایه‌های Si, SiO_2 به ترتیب برابر با $d_{Si} = 3mm, d_{SiO_2} = 6mm$ است. لایه پلاسما دارای ضخامت $d_c = 3/25mm$ و چگالی الکترونی $n_e = 1 \times 10^{18} m^{-3}$ است. در شکل ۱، دو منحنی انتقال موج بر حسب بسامد برای ساختار فوتونی بدون پلاسما و ساختار دارای لایه نقص از جنس پلاسما با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت بدون پلاسما، قله‌های عبور در محدوده بسامدی مشخصی قرار دارند و رفتار آن‌ها نسبتاً منظم و متقارن است. این رفتار ناشی از تناوب ساختار دی‌الکتریک و ایجاد گاف‌های نواری فوتونی است. در این حالت، ساختار مانند یک صافی عمل کرده و امواج تنها در بسامدهای خاصی اجازه عبور پیدا می‌کنند. اما با حضور لایه نقص از جنس پلاسما، ویژگی‌های انتقال موج به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کنند. پلاسما به دلیل وابستگی شدید ثابت دی‌الکتریک آن به بسامد و چگالی الکترونی، باعث ایجاد تشدیدهای تیز و بسیار باریک می‌شود. به‌عنوان نمونه، قله تیز و ناگهانی نزدیک ۱۱۱/۷ گیگاهرتز که در نمودار مشاهده می‌شود، مربوط به یک حالت نقص پلاسما است که تنها در حضور پلاسما ظاهر می‌شود. این قله‌های تشدید نشان می‌دهند که لایه پلاسما قادر است انرژی موج را در بسامدهایی بسیار خاص به دام انداخته و تقویت کند. همچنین حضور پلاسما موجب تغییر موقعیت قله‌ها، افزایش شدت برخی قله‌ها،

انتشار موج می‌شود و بنابراین ارتفاع قله عبور کاهش می‌یابد. حضور برخوردها همچنین شدت جابه‌جایی تشدید را کنترل می‌کند، زیرا با افزایش میرایی، فاز و دامنه پاسخ تشدید تغییر کرده و شرایط تشدید اندکی جابه‌جا می‌شود. در مجموع، برخوردها موجب کاهش کیفیت تشدید می‌شوند، درحالی‌که چگالی الکترونی مکان قله‌ها و شدت حساسیت بسامدی را تعیین می‌کند. محدوده بسامدی گزارش شده در نمودارهای عبور ($11-10\text{GHz}$) در محدوده زیر-تراهرتز قرار دارد. بسامد پلازما برای چگالی‌های الکترونی مورد بررسی، $n_e = 10^{18} - 10^{19}\text{m}^{-3}$ ، در محدوده ۲ تا ۹ گیگاهرتز قرار می‌گیرد که بسیار پایین‌تر از بسامد کاری است. در این ناحیه بسامدی، $\omega \gg \omega_p$ ، پلازما رفتاری شفاف داشته و ضریب شکست مؤثر آن $n_{eff} = \sqrt{1 - (\omega_p / \omega)^2}$ نزدیک به واحد است. بنابراین، مدهای نقص مشاهده شده در نمودارها نتیجه مستقیم شرط تداخل سازنده در کاواک فوتونی، شامل آینه‌های براگی به همراه لایه نقص پلازما، هستند و نه ناشی از تشدید پلاسمایی. حضور لایه پلازما با تغییر فاز موج بازتابیده از مرزها، امکان جابه‌جایی بسامد تشدید را فراهم می‌کند.

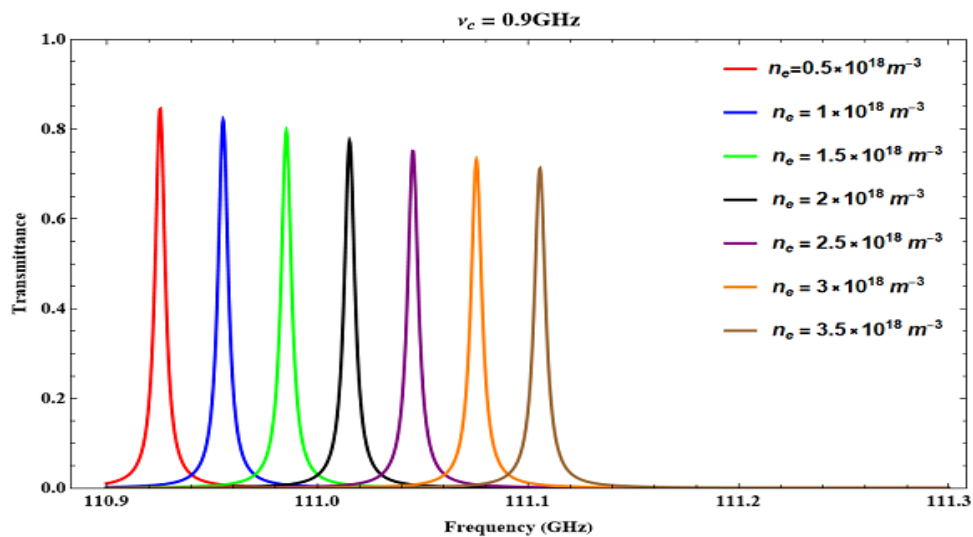
شکل ۴، نمودار تغییرات ضریب کیفیت برحسب چگالی الکترونی را نشان می‌دهد. در حالت بدون برخورد با افزایش چگالی الکترونی ضریب کیفیت به صورت جزئی کاهش می‌یابد و ساختار تقریباً پایداری خود را حفظ می‌کند. این رفتار طبیعی پلاسمای آرمانی است؛ زیرا در غیاب اتلاف، افزایش چگالی بیشتر باعث بالا رفتن بسامد پلازما و تغییر ویژگی‌های دی‌الکتریک می‌شود، اما انرژی موج تقریباً به صورت کامل حفظ شده و تشدیدها تیز باقی می‌مانند. در مقابل، در حالت دارای برخورد با افزایش چگالی الکترونی ضریب کیفیت به طور قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. برخورد الکترون‌ها با ذرات سنگین‌تر (مانند یون‌ها یا ذرات خنثی) منجر به افزایش اتلاف انرژی موج و پهن‌تر شدن تشدیدها می‌شود. این اتلاف‌ها باعث می‌شوند موج نتواند برای مدت طولانی در ساختار محبوس بماند، بنابراین ضریب کیفیت کاهش می‌یابد. حضور برخورد، حساسیت ساختار را به چگالی الکترونی بسیار بیشتر می‌کند و باعث می‌شود کارایی تشدید سامانه در چگالی‌های بالا به طور

محسوسی افت کند. در نتیجه برخوردها نقش کلیدی در محدود کردن کارایی و پاسخ تشدید ساختارهای پلاسمایی دارند. شکل ۵، تغییرات ضریب عملکرد برحسب چگالی الکترونی را نشان می‌دهد. در حالت بدون برخورد مقدار ضریب عملکرد در تمام چگالی‌های مورد بررسی بیشتر باقی می‌ماند. دلیل این رفتار آن است که در غیاب برخورد، پلازما تقریباً بدون تلفات عمل می‌کند؛ بنابراین تشدیدها تیزتر بوده و ساختار توانایی بیشتری در تقویت یا کنترل موج دارد. همچنین، با افزایش چگالی الکترونی، چون ثابت دی‌الکتریک پلازما تغییر می‌کند، ضریب عملکرد کاهش می‌یابد، اما این کاهش ملایم‌تر است و ساختار همچنان عملکرد مناسبی دارد. در حالت دارای برخورد، ضریب عملکرد به صورت محسوسی پایین‌تر است و با افزایش چگالی با شیب بیشتر کاهش می‌یابد. برخوردها باعث اتلاف انرژی موج و افزایش جذب می‌شوند. به طور خلاصه، برخوردها نقش محدود کننده دارند و باعث افت کارایی، کاهش شدت تشدید، و پایین آمدن کیفیت عملکرد ساختار فوتونی پلازما می‌شوند.

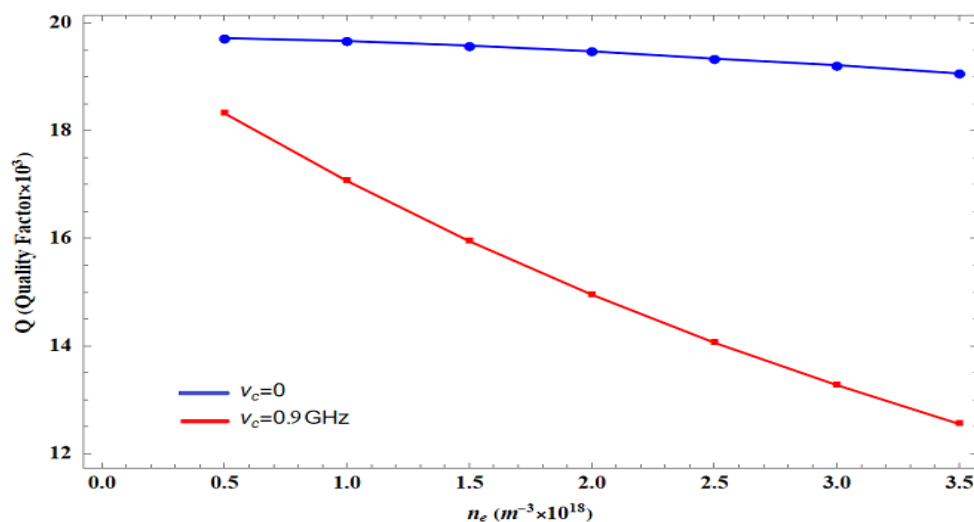
در این بخش ضریب عبور موج به صورت تابعی از بسامد برای ضخامت‌های مختلف لایه پلازما رسم شده است. درحالی‌که چگالی پلازما ثابت نگه داشته شده، تاثیر ضخامت لایه نقص بر قله‌های عبور در شکل ۶ نشان شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، حالت‌های نقص با افزایش ضخامت لایه پلازما به سمت بسامدهای پایین‌تر جابه‌جا می‌شوند، و قله‌ها نیز باریک‌تر می‌شوند. به عبارت دیگر، هر چه پلازما ضخیم‌تر شود تلفات بیشتر و تیزی تشدید کمتر و قله عبور گسترده‌تر می‌شود. هنگامی که ضخامت لایه نقص افزایش می‌یابد، حاصل ضرب ضخامت لایه نقص و ضریب شکست افزایش می‌یابد. بنابراین، طول موج قله افزایش می‌یابد در نتیجه حالت نقص به بسامدهای پایین‌تر منتقل شده، و میزان عبور افزایش می‌یابد. بنابراین برای کاربردهایی مانند صافی، لایه نقص با ضخامت کم مناسب است. این کاهش ضریب کیفیت منجر به افت و کاهش قابلیت حسگری یک ساختار می‌شود. بنابراین، ضخامت لایه پلازما به عنوان یک پارامتر کلیدی در طراحی و بهینه سازی سنسورهای مبتنی بر کاواک پلازما نقش تعیین کننده دارد.



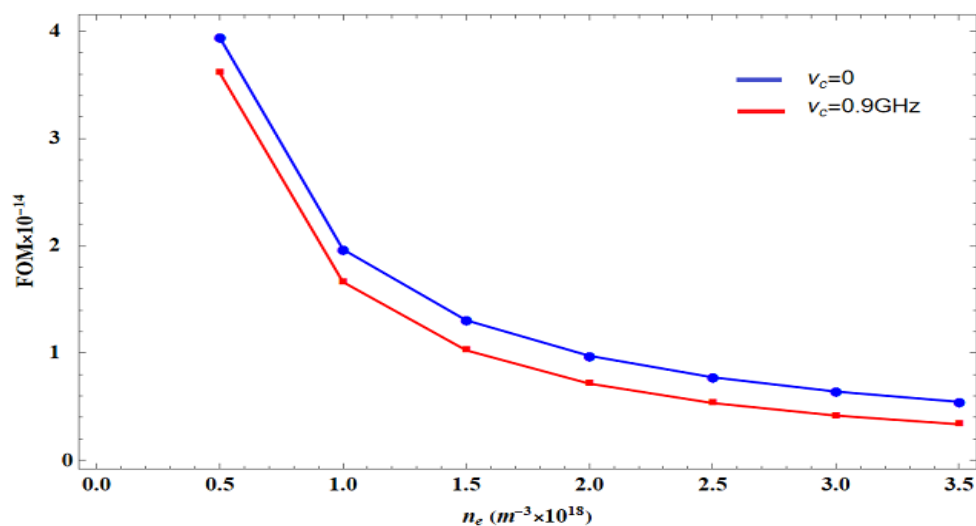
شکل ۲. نمودار ضریب عبور برحسب بسامد برای بسامدهای برخورد مختلف.



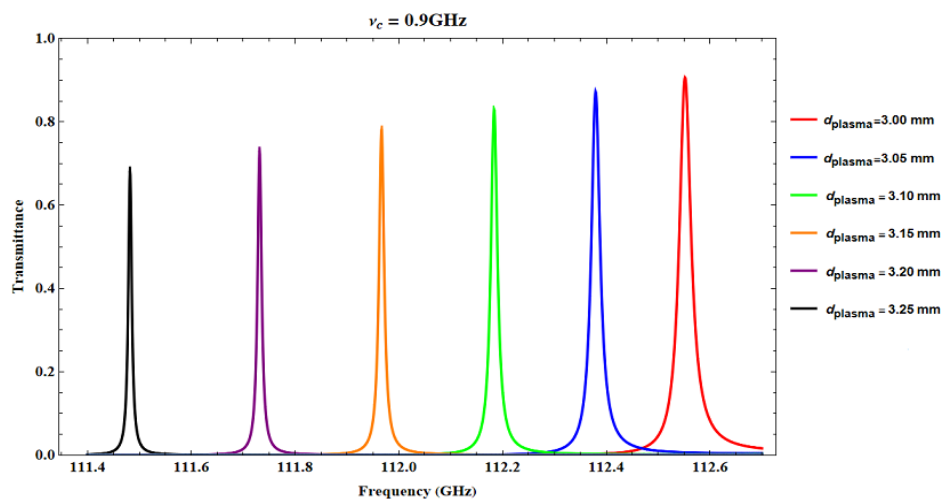
شکل ۳. نمودار ضریب عبور برحسب بسامد برای چگالی‌های مختلف.



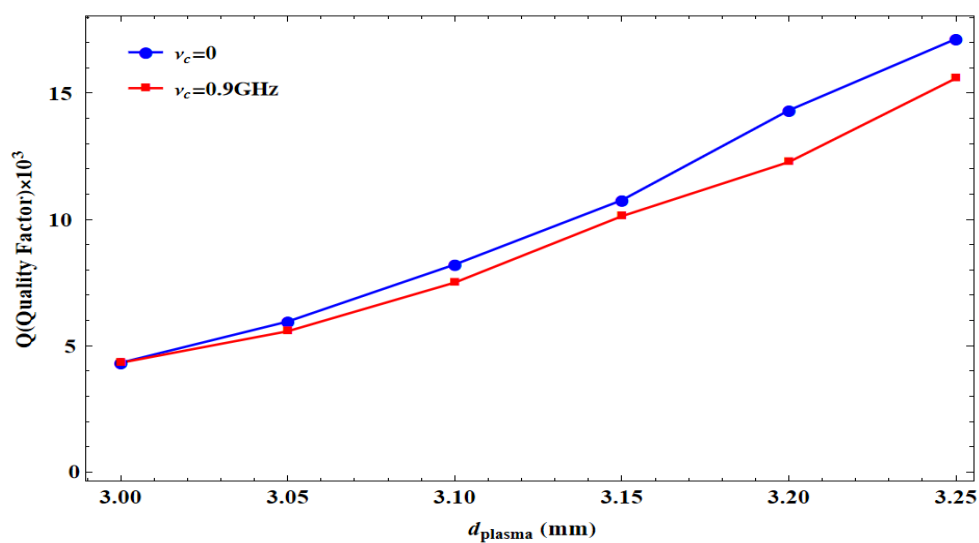
شکل ۴. نمودار ضریب کیفیت برحسب چگالی الکترونی.



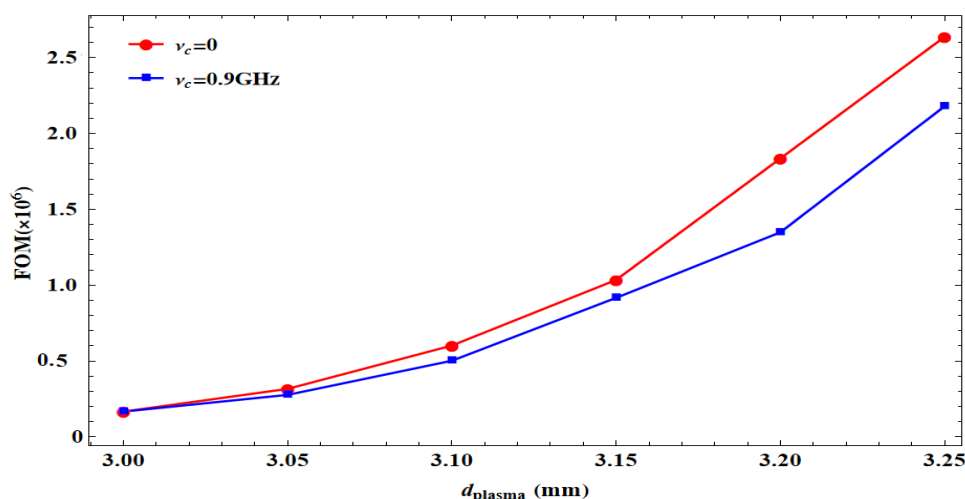
شکل ۵. نمودار ضریب عملکرد بر حسب چگالی الکترونی.



شکل ۶. نمودار ضریب عبور بر حسب بسامد برای ضخامت‌های مختلف لایه پلازما.



شکل ۷. نمودار ضریب کیفیت بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه پلازما.



شکل ۸. نمودار ضریب عملکرد بر حسب ضخامت‌های مختلف لایه پلاسما.

در حالت دارای برخورد، نمودار ضریب کیفیت همواره مقدار پایین‌تری دارد، زیرا برخوردهای الکترون با یون‌ها و اتم‌های خنثی باعث افزایش اتلاف انرژی می‌شود. این اتلاف به شکل افزایش ضریب دی‌الکتریک نمایان می‌شود. برخوردهای الکترونی، انرژی جذب شده از میدان را به گرما تبدیل کرده و موجب افزایش مؤلفه موهمی گذردهی و افزایش ضریب میرایی موج می‌شوند. این پدیده باعث پهن‌تر شدن پاسخ تشدید و کاهش انرژی ذخیره‌شده در ساختار می‌شود که مستقیماً افت ضریب کیفیت را رقم می‌زند. بنابراین، برخوردها به‌عنوان یک سازوکار مؤثر عمل کرده و کیفیت تشدید و توانایی نگه‌داری انرژی موج در محیط را محدود می‌کنند. به‌طور خلاصه، نقش برخوردها کاهش طول عمر مد تشدید و افزایش میرایی موج است و همین موضوع باعث افت ضریب کیفیت در کل بازه ضخامت‌ها می‌شود.

شکل ۸، نمودار ضریب عملکرد بر حسب ضخامت لایه نقص پلاسما برای مقادیر مختلف ضخامت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب عملکرد در حالت بدون برخورد بیشتر است. این ضریب، FOM ، اساساً معیاری از کارایی انتقال موج نسبت به میزان تلفات است. بنابراین، در محیطی که برخورد وجود ندارد، چون انرژی موج کمتر جذب می‌شود، گذردهی مؤثر افزایش یافته و تلفات کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه مقدار ضریب عملکرد به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. در واقع، وقتی برخورد وجود نداشته باشد، ضریب میرایی موج بسیار کوچک است و موج می‌تواند فاصله بیشتری

نقش برخوردها در این نمودار بسیار اساسی است. وجود برخوردهای الکترون-خنثی یا الکترون-یون باعث ایجاد اتلاف و میرایی در انتشار موج می‌شود و در نتیجه بخشی از انرژی موج قبل از رسیدن به حالت تشدید، از دست می‌رود. برخوردها موجب پهن‌تر شدن قله‌ها و کاهش ارتفاع آن‌ها می‌شوند و کیفیت تشدید را پایین می‌آورند. با وجود برخوردها، حتی با تغییر ضخامت نیز نمی‌توان به قله‌های کاملاً آرمانی رسید، زیرا میرایی باعث محدود شدن انرژی موج و کاهش بیشینه عبور می‌شود. بنابراین، در این نمودار ضخامت تعیین‌کننده مکان تشدید است، ولی برخوردها تعیین‌کننده شکل و کیفیت قله‌های تشدید هستند.

شکل ۷، تغییرات ضریب کیفیت بر حسب ضخامت لایه نقص پلاسما را برای مقادیر مختلف ν_e نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام ضخامت‌ها، مقدار ضریب کیفیت در حالت بدون برخورد بیشتر از حالت دارای برخورد است. در غیاب برخوردها، الکترون‌ها در میدان الکترومغناطیسی با کمترین اتلاف انرژی نوسان می‌کنند. در این حالت، بخش موهمی گذردهی دی‌الکتریک کوچک است و میرایی موج به حداقل می‌رسد. در چنین شرایطی، موج می‌تواند انرژی خود را برای مدت طولانی‌تری حفظ کند و قله تشدید ساختار باریک‌تر و قوی‌تر خواهد بود؛ در نتیجه ضریب کیفیت افزایش می‌یابد. به بیان فیزیکی، پلاسما در این حالت مانند یک نوسانگر تقریباً آرمانی عمل می‌کند که تلفات در آن ناچیز است.

را در محیط طی کرده و همچنان انرژی خود را حفظ کند. بنابراین، نسبت انتقال به اتلاف، یعنی FOM ، به طور مؤثر افزایش می یابد. اما در حالت دارای برخورد، ضریب عملکرد در تمام ضخامت ها کمتر است. دلیل فیزیکی این کاهش این است که برخوردها باعث افزایش اتلاف انرژی موج و افزایش جذب درون پلاسما می شوند. برخوردها باعث می شوند الکترون ها انرژی دریافتی از موج را به گرما تبدیل کنند. بنابراین، موج سریع تر تضعیف می شود و بخش موهومی گذردهی افزایش پیدا می کند. این بدین معنی است که موج توان کمتری برای عبور از لایه پلاسما دارد و بخش بزرگتری از انرژی ورودی در محیط تلف می شود. بنابراین، نقش برخوردها کاهش شفافیت پلاسما، افزایش جذب و کاهش نسبت انتقال به اتلاف است که به صورت کاهش پارامتر FOM در نمودار نمایان می شود.

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، انتشار موج الکترومغناطیسی در یک بلور فوتونی یک بعدی با لایه پلاسمای همگن به عنوان لایه نقص بررسی شد. نقش ضخامت لایه پلاسما، چگالی الکترونی و بسامد برخوردی در ایجاد حالت های تشدیدی در یک ساختار فوتونی یک بعدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پاسخ دی الکتریک پلاسما وابستگی شدیدی به چگالی الکترونی، ضخامت لایه و بسامد برخورد دارد و این پارامترها به صورت مستقیم الگوی پاشندگی و گذردهی موج را تعیین می کنند. به ویژه، مشاهده شد که افزایش چگالی سبب جابه جایی بسامد تشدید به ناحیه های بالاتر می شود، در حالی که تغییر ضخامت

مراجع

1. P P Sun, R Zhang, W Chen, P V Braun, & J G Eden, *Applied Physics Reviews* **6** (2019) 4.
2. G Lehmann, & K H Spatschek, *Physical review letters* **116**(22) (2016) 225002.
3. B Wang, & M A Cappelli, *Applied Physics Letters* **108** (2016) 16.
4. P P Sun, R ZhangChen, W Braun, P V, & J G Eden, *Applied Physics Reviews* **6** (2019) 4.
5. N Shanmugam, R Pugazhendhi, R Madurai Elavarasan, P Kasiviswanathan, & N Das, *Energies* **13** (2020) 2631.
6. V L Kalyani, & V Sharma, *Journal of Management Engineering and Information Technology (JMEIT)* **3** (2016) 3.
7. P P Ewald, *Reviews of modern physics* **37**(1) (1965) 46.
8. V Asadchy, M Albooyeh, & S Tretyakov, *Journal of the Optical Society of America B* **33**(2) (2016) A16-A20.

موقعیت و شدت قله های عبور را تحت تأثیر قرار می دهد. علاوه بر این، اثرات ساختاری، حضور برخوردهای الکترون-یون و الکترون-خنثی نقش تعیین کننده ای در کیفیت تشدید ایفا می کند. تحلیل ها نشان داد که برخوردها به عنوان یک سازوکار اتلافی، موجب کاهش دامنه نوسان الکترون ها و افزایش مؤلفه موهومی ثابت دی الکتریک می شوند. این پدیده به شکل کاهش ارتفاع قله عبور، پهن تر شدن طیف تشدید و افت ضریب کیفیت ظاهر شده، و نشان می دهد که الگوسازی بدون برخورد قادر به بازتولید رفتار واقعی پلاسما نیست.

مقایسه منحنی های عبور و ضرایب کیفیت در شرایط مختلف نشان داد که افزایش بسامد برخورد سبب افزایش جذب و کاهش انتقال می شود و ضریب عملکرد به طور محسوسی کاهش می یابد. این موضوع تأیید می کند که میرایی ناشی از برخوردها یک عامل غالب در تعیین ویژگی های موج است و نمی توان آن را نادیده گرفت. از سوی دیگر، تغییرات ضخامت و چگالی امکان تنظیم هدف مند موقعیت تشدید و کنترل پهنای طیفی قله ها را فراهم می کند، که این خود برای طراحی صافی ها و ساختارهای فوتونی مبتنی بر پلاسما اهمیت دارد.

در نهایت، نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب الگوی برخوردی با تحلیل لایه به لایه می تواند رفتار موج را با دقت بالایی پیش بینی کند و با نتایج تجربی و شبیه سازی های مقالات معتبر هم خوانی دارد. این چارچوب تحلیلی می تواند برای طراحی و بهینه سازی ساختارهای مبتنی بر پلاسما به کار گرفته شود. بر این اساس، توجه به اثرات برخورد و استفاده از الگوی دی الکتریک کامل، شرط لازم برای تحلیل فیزیکی دقیق و ارائه راهکارهای عملی در سامانه های پلاسما-فوتونی است.

9. M F Land, *Scientific American*, **239(6)** (1978) 126.
10. T P Otanicar, D DeJarnette, Y Hewakuruppu, & R A Taylor, *Advances in Optics and Photonics*, **8(3)** (2016) 541.
11. E Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58** (1987) 2059.
12. E Yablonovitch, T J Gmitter, and K M Leung, *Phys. Rev. Lett.* **67** (1991) 2295-2298.
13. M chen Xu, S Liu, and S ying Zhong, *Opt. Quantum Electron.* **51** (2019) 1.
14. S Yano, Y Segawa, J S Bae, K Mizuno, H Miyazaki, K Ohtaka, and S Yamaguchi *Phys. Rev. B* **63** (2001) 1533161.
15. X K Kong, S Bin Liu, H F Zhang, and C Z Li, *Phys. Plasmas* **17** (2010) 103506.
16. T T Shih, Y D Wu, and J J Lee, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **21** (2009) 18.
17. W O F Carvalho, & J R Mejía-Salazar, *Sensors* **20(9)** (2020) 2488.
18. N Shanmugam, R Pugazhendhi, R Madurai Elavarasan, P Kasiviswanathan, & N Das, *Energies* **13** (2020) 2631.
19. E Yablonovitch, T J Gmitter, and K M Leung, *Physical review letters* **67** (1991) 2295.
20. Alkawgani, A H, Alhamss, D N, Taya, S A, Colak, I, Sharma, A, Alhawari, A R, & Patel, S K *Physics of Fluids* **34(8)** (2022).
21. H Hojo, & A Mase, *Journal of Plasma and Fusion Research* **80(2)** (2004) 89.
22. M Chen Xu, S Liu, and S ying Zhong, *Opt. Quantum Electron.* **51** (2019) 1.
23. S A Taya, M A Abutailkh, I Colak, and O M Ramahi *Opt. Quantum Electron.* **53** (2021) 1.
24. L M Qi, Z Q Yang, F Lan, X Gao, and Z J Shi *Phys. Plasmas* **17** (2010) 042501.
25. Wang Y, Liu S, & Zhong S. *Optics Communications* **473** (2020) 125985.
26. S A Taya, N E Al-Ashi, O M Ramahi, I Colak, and I S Amiri, *J Opt. Soc. Am. B* **38** (2021) 2362.