

طراحی موجبر براگ گریتینگ پلاسمونی گرافنی برای تحقق نور کند

پیمان قادریان، امیر حبیبزاده شریف، افشین احمدپور
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
sharif@sut.ac.ir

چکیده - ذخیره‌سازی و کاهش سرعت نور یک چالش مهم است. با توجه به روش جدیدی که برای تحقق نور کند ارائه شده است، ساختارهای براگ گریتینگ پلاسمونی مبتنی بر گرافن نتایج امیدوارکننده‌ای را از خود نشان داده‌اند. علاوه بر این، با توجه به خواص ویژه‌ای که گرافن از خود نشان داده است، می‌توان خواص ساختارهای مبتنی بر این ماده را با اعمال ولتاژ خارجی کنترل کرد. در این مقاله، یک ساختار موجبری صفحات موازی متقارن پلاسمونی ارائه شده است. با تغییر پارامترهای هندسی، یک ساختار بهینه‌کننده موج SPP معرفی شده و در ادامه، به منظور افزایش پهنای باند عملکردی قطعه طراحی شده، عرض براگ گریتینگ‌ها به صورت تدریجی افزایش داده شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، ضریب کاهش سرعت در پهنای باند ۲/۵ میکرومتر در طیف مادون قرمز میانی تا مقدار ۶۹۰ افزایش یافته است. به دلیل تنظیم‌پذیری بالای این ساختار پیشنهادی می‌توان از آن در کاربردهای مختلفی از جمله سوئیچ‌های نوری و بافرهای نوری قابل تنظیم استفاده کرد. کلید واژه- نور کند، حبس نور، گریتینگ موجبری، گریتینگ تدریجی پلاسمونی، گرافن.

سرعت نور می‌بایست از مهندسی پاشندگی استفاده کرد. یکی از ساختارهایی که پاشندگی قابل قبولی را به ارمغان می‌آورد، ساختار براگ گریتینگ تدریجی موجبری است [۵]. از طرفی، ساختارهای براگ گریتینگ تدریجی پلاسمونی مبتنی بر فلزات نوبل با توجه به تلفات اهمی قابل توجه، ساختارهای خوبی برای کاهش سرعت نور نیستند [۶]. در سال‌های اخیر، ماده جدیدی به نام گرافن توسط محققین کشف شده است که از جنبه‌های مختلف نوری، شیمی، مواد و ... دارای ویژگی‌های منحصر به فردی است. گرافن یک ماده دو بعدی است که از کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن در یک شبکه لانه زنبوری تشکیل می‌شود [۷، ۸]. گرافن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند تنظیم‌پذیری توسط میدان الکتریکی، محدودشدگی بهتر نور و تلفات بسیار کمتر، در ساختارهای پلاسمونی نسبت به فلزات نوبل ترجیح داده می‌شود [۹]. محققین با استفاده از موجبرهای براگ گریتینگ پلاسمونی گرافنی توانسته‌اند ضریب کاهش سرعت قابل توجهی را تحقق داده و تلفات نور انتشاری را با استفاده از گرافن به طور قابل توجهی کاهش دهند [۱۰]. در این مقاله با استفاده از براگ گریتینگ تدریجی توانسته‌ایم ضریب کاهش سرعت ۶۹۰ با پهنای باند ۲/۵ میکرومتر در طیف مادون قرمز میانی را تحقق دهیم. همچنین در این ساختار، ویژگی حبس نور نیز تحقق یافته است و ولتاژ مورد نیاز برای آزادسازی انتخابی طول موج‌های حبس شده نیز به دست آمده است.

1- مقدمه

نور کند با انتشار یک پالس نوری با سرعت گروه بسیار پایین تحقق می‌یابد. از کاربردهای نور کند می‌توان به حافظه‌های نوری، افزایش خاصیت غیرخطی، پردازش سیگنال‌های نوری، بافرهای نوری و سوئیچ‌های نوری اشاره کرد [۱]. کاربردهای ذکر شده امروزه در مدارهای مجتمع نوری جایگاه ویژه‌ای دارند و همانطور که می‌دانیم، موجبرهای نوری ساختار پایه این مدارها هستند؛ در نتیجه، تحقق نور کند در موجبرهای نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پالس‌های نوری در یک محیط با ضریب شکست n با سرعت گروه $v_g = c/(n + \omega dn/d\omega)$ منتشر می‌شوند که ω فرکانس زاویه‌ای و c سرعت نور در خلأ است [۲، ۳]. میزان کاهش سرعت نور توسط پارامتری به نام ضریب کاهش سرعت S بیان می‌شود:

$$S = \frac{c}{v_g} = c \frac{d\omega}{dk} = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (1)$$

با توجه به این رابطه، مقدار پارامتر S به دو عامل اصلی وابسته است [۴]: ۱- ضریب شکست محیط و ۲- پاشندگی محیط. همانطور که می‌دانیم، ضریب شکست مواد نوری مقدار محدودی دارد؛ علاوه بر این، پاشندگی مواد نوری قابل دسترس نیز بسیار پایین است. پس به طور ذاتی نمی‌توان سرعت نور را به خوبی کاهش داد. بنابراین، برای افزایش پاشندگی و در نتیجه، کاهش

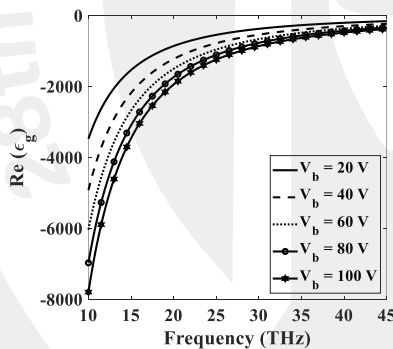
2- مشخصات الکتریکی و نوری گرافن

مقاله، ضخامت لایه گرافن برابر مقدار واقعی آن، یعنی 0.33 nm در نظر گرفته شده است.

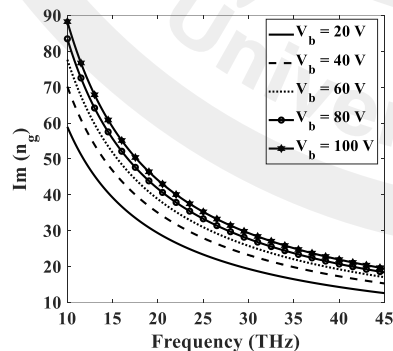
$$\varepsilon_g = 1 + i\sigma_g / \varepsilon_0 \omega t_g \quad (5)$$

$$n_g = \sqrt{\varepsilon_g} \quad (6)$$

مطابق شکل ۱، در بازه فرکانسی 10 THz تا 45 THz، قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی گرافن به ازای تمامی ولتاژها مقدار منفی دارد؛ در نتیجه به عنوان هادی می‌توان از آن در ساختارهای پلاسمونی استفاده کرد. علاوه بر این، قسمت موهومی ضریب شکست گرافن نیز بیانگر میزان تلفات نور در این ماده است که در فرکانس 10 THz دارای حداکثر مقدار بوده و با افزایش فرکانس، مقدار آن کاهش یافته و در نتیجه، تلفات نوری گرافن کاهش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش V_b مشخص است که منحنی تغییرات $\text{Re}(\varepsilon_g)$ به سمت مقادیر منفی‌تر و منحنی تغییرات $\text{Im}(n_g)$ به سمت مقادیر بالاتر شیفت می‌یابد. این رفتار را با کاهش h نیز می‌توان مشاهده کرد، چرا که با کاهش ضخامت لایه سیلیکا، برهمکنش ولتاژ اعمالی با گرافن بیشتر شده و مقدار دوپینگ آن افزایش یافته و در نتیجه، مقدار حقیقی ضریب گذردهی منفی‌تر شده و مقدار تلفات آن افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱. اثر تغییرات فرکانس و ولتاژ V_b بر روی (الف) قسمت حقیقی ضریب گذردهی الکتریکی گرافن و (ب) قسمت موهومی ضریب شکست گرافن. در اینجا $h = 50 \text{ nm}$ و $\varepsilon_d = 3.9$ در نظر گرفته شده‌اند.

در محدوده مادون قرمز میانی، هدایت سطحی گرافن σ_g یک کمیت مختلط بوده و توسط فرمول کوبو (Kubo) محاسبه می‌شود [۱۱، ۱۲]. هدایت سطحی گرافن به عنوان تابعی از ω (فرکانس زاویه‌ای فوتون در خلأ)، μ_c (پتانسیل شیمیایی یا انرژی فرمی)، τ (زمان آرامش حامل‌ها) و T (دمای محیط)، مطابق رابطه $\sigma_g(\omega, \mu_c, \tau, T) = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$ شامل دو قسمت هدایت بین‌باندی و هدایت درون‌باندی است. قسمت اول، بیانگر پراکندگی الکترون-فوتون درون‌باندی است و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{intra} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \times \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(\exp \left(\frac{-\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right) \right] \quad (2)$$

در این رابطه، e بار الکترون، \hbar ثابت کاهش‌یافته پلانک و k_B ثابت بولتزمن است. قسمت دوم هدایت سطحی، ناشی از انتقال بین باندی است که با در نظر گرفتن $\hbar\omega \gg k_B T$ و $|\mu_c| \gg k_B T$ خواهیم داشت:

$$\sigma_{inter} \approx \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega + i\tau^{-1})\hbar}{2|\mu_c| + (\omega + i\tau^{-1})\hbar} \right) \quad (3)$$

در تمامی شبیه‌سازی‌های این مقاله، دمای محیط $T = 300 \text{ K}$ در نظر گرفته شده است. در گرافن τ وابسته به μ (قابلیت تحرک حامل‌ها) است و با استفاده از رابطه $\tau = \mu \mu_c / e v_f^2$ قابل محاسبه است. v_f در این رابطه بیانگر سرعت فرمی بوده که مقدار 10^6 m/s برای آن در نظر گرفته شده است [۱۳]. مقدار μ به عوامل مختلفی وابسته است و نشان داده شده است که مقدار آن از $20,000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ تا $200,000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ و حتی بیشتر نیز قابل تغییر است [۱۴]. در اینجا $\mu = 25,000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ انتخاب شده است. پتانسیل شیمیایی نیز از طریق رابطه $\mu_c = \hbar v_f (\pi n_s)^{1/2}$ قابل محاسبه است [۱۳]. سطح دوپینگ گرافن (n_s) از رابطه (۴) به دست می‌آید که تابعیت خطی n_s نسبت به V_b و h^{-1} را نشان می‌دهد [۱۱].

$$n_s = \frac{\varepsilon_d \varepsilon_0 V_b}{eh} \quad (4)$$

در این رابطه ε_0 ضریب گذردهی هوا، ε_d و h به ترتیب، ضریب گذردهی و ضخامت عایق جداکننده سیلیکون و گرافن، و V_b ولتاژ اعمالی برای دوپینگ گرافن است. بنابراین، سطح دوپینگ گرافن را می‌توان توسط پتانسیل شیمیایی و ضخامت عایق جداکننده سیلیکون و گرافن تنظیم کرد [۱۱]. بدین ترتیب می‌توان ε_g (ثابت دی‌الکتریک گرافن) و n_g (ضریب شکست گرافن) را با استفاده از روابط (۵) و (۶) محاسبه کرد. در رابطه (۵) بیانگر ضخامت مؤثر گرافن است [۱۵]. در تمامی شبیه‌سازی‌های این

3- نتایج شبیه‌سازی

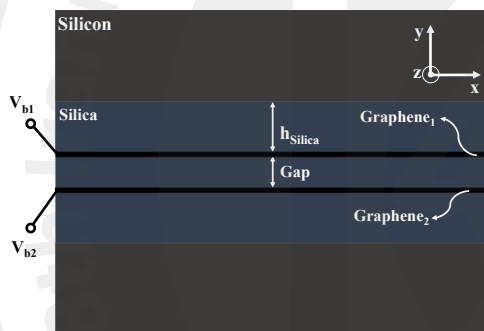
3-1- موجبر صفحات موازی متقارن پلاسمونی

سطح مقطع طولی موجبر صفحات موازی متقارن پلاسمونی مطابق شکل ۲(الف) نشان داده شده است. انتشار نور در جهت $+x$ در نظر گرفته شده است. این ساختار متشکل از دو لایه گرافن موازی روی زیرلایه سیلیکونی و بافر سیلیکایی با ضخامت موازی روی $h_{\text{Silica}} = 50 \text{ nm}$ است. شکاف بین دو لایه گرافنی نیز توسط سیلیکا پر شده است که در اینجا 20 nm در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب هدایت سطحی لایه‌های گرافن توسط ولتاژهای اعمالی $V_{b1} = V_{b2} = V_b$ تنظیم می‌شوند. در اینجا از روش حل عددی المان محدود برای تحلیل انتشار مدهای هدایتی ساختار بهره برده‌ایم. ضرایب شکست سیلیکا و سیلیکون به ترتیب $n_{\text{Si}} = 3.42$ و $n_{\text{SiO}_2} = 1.97$ در نظر گرفته شده‌اند. منحنی ضریب شکست مؤثر مود انتشاری موجبر به عنوان تابعی از طول موج در شکل ۲(ب) رسم شده است. مطابق این شکل، میزان تلفات به ازای فرکانس‌های بزرگتر افزایش می‌یابد، زیرا قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر در این فرکانس‌ها افزایش یافته است. علاوه بر این، میزان محدودشدگی نور در اطراف گرافن به ازای فرکانس‌های بزرگتر بیشتر از فرکانس‌های کوچکتر است، زیرا مقدار حقیقی ضریب شکست مؤثر به ازای فرکانس‌های بزرگتر بیشتر است و با کاهش فرکانس، مقدار آن به تدریج کاهش می‌یابد. پروفایل مجذور مؤلفه y توزیع میدان الکتریکی $(|E_y|^2)$ به ازای فرکانس 30 THz در شکل ۲(ج) نشان داده شده است. بیشترین محدودشدگی نوری در داخل شکاف بین دو لایه گرافن مشاهده می‌شود و با توجه به اینکه در اینجا سیلیکا بی‌اتلاف در نظر گرفته شده است، میزان تلفات ساختار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

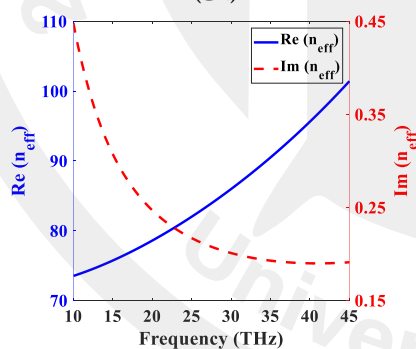
3-2- موجبر براگ گریتنینگ پلاسمونی گرافنی

موجبر براگ گریتنینگ دارای ساختار متناوب بوده و می‌تواند نقش یک فیلتر و یا آینه را ایفا کند [۱۶، ۱۷]. در واقع، ساختارهای براگ گریتنینگ یک طول موج مشخص را منعکس کرده و طول موج‌های دیگر را عبور می‌دهند [۱۷]. سطح مقطع طولی موجبر براگ گریتنینگ صفحات موازی متقارن پلاسمونی مطابق شکل ۳(الف) نشان داده شده است. انتشار نور در جهت $+x$ در نظر گرفته شده است. گریتنینگ موجبری در داخل ناحیه شکاف بین دو لایه گرافن موجبر صفحات موازی ایجاد شده است. شیارهای ایجاد شده از جنس هوا هستند که با عرض w_1 نشان داده شده‌اند و عرض گریتنینگ‌ها با w_2 مشخص شده و با دوره تناوب p تکرار می‌شوند. در

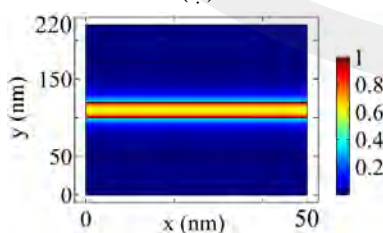
اینجا، پهنای باند ساختار، اختلاف بین دو طول موج تعریف می‌شود که میزان انتقال نور در آن‌ها به کمتر از ۵ درصد رسیده است. معیار این انتخاب، حداقل میزان تلفات است که در شکل ۳(ب) به وضوح دیده می‌شود. همانطور که مشخص است، بازه پهنای باند ضریب انعکاس ساختار به ازای ولتاژهای مختلف V_b متفاوت است. به این صورت که با کاهش ولتاژ اعمالی، پهنای باند کاری به سمت طول‌موج‌های بلندتر شیفت می‌یابد. بنابراین، طیف انعکاسی این ساختارهای براگ گریتنینگ وابسته به ولتاژ اعمالی V_b نیز است، چرا که دوپینگ گرافن با این ولتاژ رابطه مستقیم دارد [۱۰]. در ادامه، به بررسی تغییرات عرض گریتنینگ‌ها پرداخته‌ایم و بدین منظور، در شکل ۳(ج) منحنی ضریب انعکاس ساختار را به ازای عرض گریتنینگ‌ها رسم کرده‌ایم. همانطور که مشاهده می‌شود، پهنای باند ضریب انعکاس ساختار، به طور مستقیم به عرض گریتنینگ‌ها وابسته بوده و با افزایش این پارامتر هندسی، پهنای باند ضریب انعکاس وسیع‌تر می‌شود.



(الف)



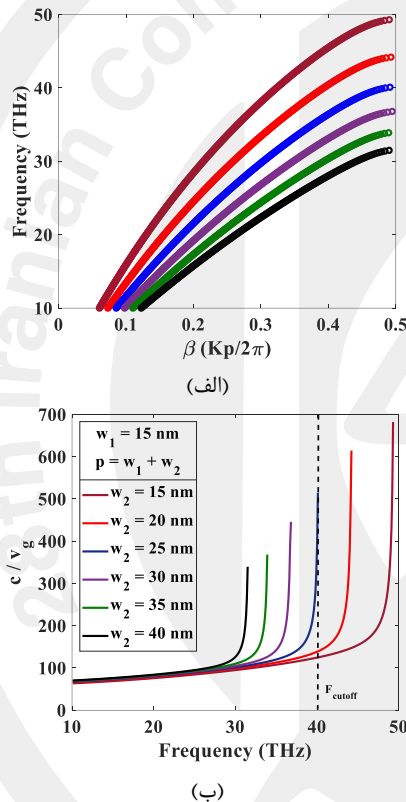
(ب)



(ج)

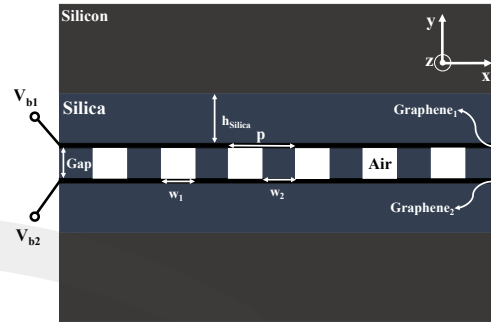
شکل ۲. (الف) سطح مقطع طولی موجبر صفحات موازی متقارن پلاسمونی. (ب) منحنی‌های ضریب شکست مؤثر مود انتشاری اول به عنوان تابعی از طول موج. (ج) پروفایل میدان الکتریکی به ازای طول موج $10 \mu\text{m}$.

افزایش عرض گریتینگ‌ها کاهش می‌یابد. سرعت گروه v_g از طریق محاسبه شیب منحنی پاشندگی نشان داده شده در شکل ۴(الف) به دست می‌آید [۴]. در شکل ۴(ب) منحنی‌های ضریب کاهش سرعت بر حسب فرکانس و به ازای عرض گریتینگ‌های مختلف نشان داده شده‌اند. خطچین رسم شده در این شکل، بیانگر فرکانس قطع متناظر ساختار با عرض گریتینگ $w_2 = 25$ nm است. منحنی‌های ضریب کاهش سرعت در فرکانس‌های نزدیک قطع دارای مقدار بیش از ۳۰۰ هستند. این ضریب توسط تلفات اهمی گرافن محدود شده است؛ که می‌توان مقدار آن را از طریق پارامترهای فیزیکی مانند قابلیت تحرک حامل‌ها افزایش داد [۱۷].

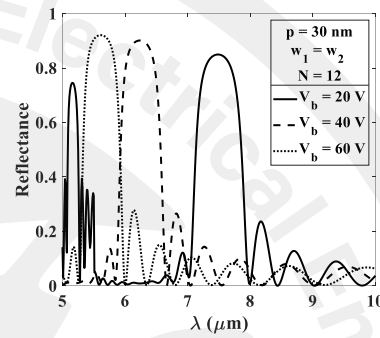


شکل ۴. (الف) منحنی پاشندگی به ازای مقادیر مختلف عرض گریتینگ‌ها، (ب) ضریب کاهش سرعت به ازای مقادیر مختلف عرض گریتینگ‌ها.

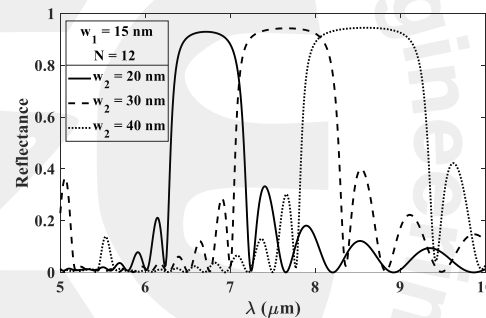
مشخص است که موجبر براگ گریتینگ پلاسمونی گرافنی تنها قادر به کاهش سرعت یک طول موج، یعنی همان طول موج کاری براگ گریتینگ یا همان طول موج قطع متناظر با عرض شیار مشخص گریتینگ است. پس با این شرایط، پهنای باند بسیار محدودی برای کاهش سرعت نور در اختیار خواهیم داشت. به منظور رفع این محدودیت، موجبر براگ گریتینگ تدریجی صفحات موازی متقارن پلاسمونی را طراحی می‌کنیم.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳. (الف) سطح مقطع طولی موجبر براگ گریتینگ پلاسمونی گرافنی. (ب) و (ج) منحنی‌های ضریب انعکاس موجبر براگ گریتینگ به ازای ولتاژهای مختلف اعمالی و مقادیر مختلف عرض گریتینگ‌ها.

کاهش سرعت نور توسط ساختار براگ گریتینگ در طول موج قطع آن رخ می‌دهد که می‌توان ضریب آن را از حل معادله پاشندگی به دست آورد. با حل عددی معادله پاشندگی ساختار براگ گریتینگ پلاسمونی گرافنی به رابطه (۷) می‌رسیم [۸].

$$\cos(Kp) = \cos(k_1 w_1) \cos(k_2 w_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{n_{eff,1}}{n_{eff,2}} + \frac{n_{eff,2}}{n_{eff,1}} \right) \sin(k_1 w_1) \sin(k_2 w_2) \quad (7)$$

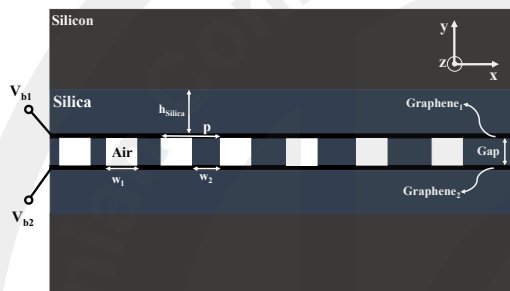
که در اینجا، k بیانگر عدد موج بلاخ امواج SPP در جهت x بوده و $k_1 = k_0 n_{eff,1}$ و $k_2 = k_0 n_{eff,2}$ به ترتیب بیانگر اعداد موج در نواحی گریتینگ با عرض w_1 (با ضریب شکست مؤثر $n_{eff,1}$) و عرض w_2 (با ضریب شکست مؤثر $n_{eff,2}$) هستند. با حل معادله مشخصه (۷) می‌توان مطابق شکل ۴(الف)، منحنی پاشندگی را به ازای عرض گریتینگ‌های مختلف رسم کرد. مشخص است که فرکانس قطع با

3-3- موجبر براگ گریتینگ تدریجی پلاسمونی گرافنی

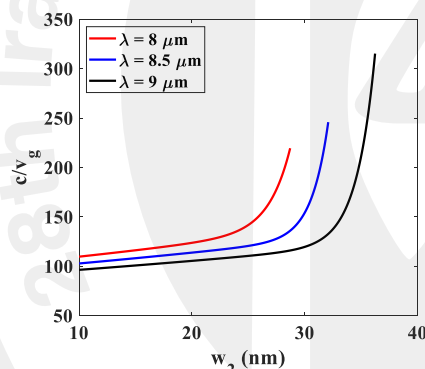
با استفاده از یک ساختار براگ گریتینگ تدریجی پلاسمونی می‌توان پهنای باند وسیع‌تری را تحقق داد. شرط لازم برای استفاده از این روش این است که تغییرات تدریجی عرض شیارها به اندازه کافی کوچک باشند. ساختار پیشنهادی این مقاله در شکل ۵(الف) نشان داده شده است که تغییرات تدریجی گریتینگ در راستای انتشار (جهت x) اعمال شده است. در مطالعات قبلی، ساختارهای براگ گریتینگ چیرپ شده برای افزایش پاشندگی معرفی شده‌اند که در این نوع ساختارها عرض شیار گریتینگ در هر دوره تناوب به صورت تدریجی تغییر می‌کند [۱۸]. در اینجا نیز از این مکانیزم برای به دام انداختن نور استفاده شده است؛ با این تفاوت که در ساختار طراحی شده اولاً از یک ساختار موجبر صفحات موازی با دو لایه گرافن مجزا استفاده شده و ثانیاً فقط w_2 بصورت تدریجی تغییر می‌کند. در حالی که در [۱۸]، از یک موجبر صفحه‌ای با یک لایه گرافن استفاده شده و هر دو w_1 و w_2 بصورت همزمان تغییرات تدریجی دارند. نشان داده خواهد شد که ساختار طراحی شده در این مقاله در مقایسه با ساختار ارائه شده در [۱۸]، ضمن اینکه از طول کمتری برخوردار است، دارای مشخصات عملکردی بهتری نیز هست. در اینجا $w_1 = 15 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده و w_2 با گام 2 nm از 15 nm تا 41 nm در راستای انتشار تغییر می‌یابد.

ضریب کاهش سرعت به عنوان تابعی از عرض گریتینگ‌ها در شکل ۵(ب) به ازای سه طول موج 8 ، 8.5 و 9 میکرومتر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب کاهش سرعت وابستگی شدیدی به این پارامتر هندسی دارد. شکل ۵(ج) پروفایل مجذور میدان الکتریکی ($|E|^2$) در صفحه xy ساختار به ازای طول موج‌های 8 ، 8.5 و 9 میکرومتر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با انتشار نور در جهت x به تدریج سرعت آن در طول موج‌های مختلف کاهش یافته و در نهایت، سرعت نور در هر طول موج در گریتینگ متناظر به صفر رسیده و حبس نور تحقق می‌یابد. از طریق محاسبات دقیق می‌توان نشان داد که طول موج‌های 8 ، 8.5 و 9 میکرومتر به ترتیب به ازای ولتاژ اعمالی و $V_b = 40 \text{ V}$ در موقعیت‌های مکانی $x = 150 \text{ nm}$ ، $x = 210 \text{ nm}$ و $x = 300 \text{ nm}$ حبس شده‌اند. این حبس‌شدگی نور با پهنای باند بسیار وسیع $2.5 \mu\text{m}$ ($8 \mu\text{m}$ تا $10.5 \mu\text{m}$) تحقق یافته است که نسبت به کارهای قبلی، حاکی از پیشرفت بسیار خوبی در این زمینه است. این پهنای باند را می‌توان با تغییر ولتاژ مرجع تغییر داد. یک ویژگی جالب دیگر این ساختار، امکان آزادسازی طول موج‌های حبس شده است که این کار با تغییر ولتاژ V_b انجام می‌شود.

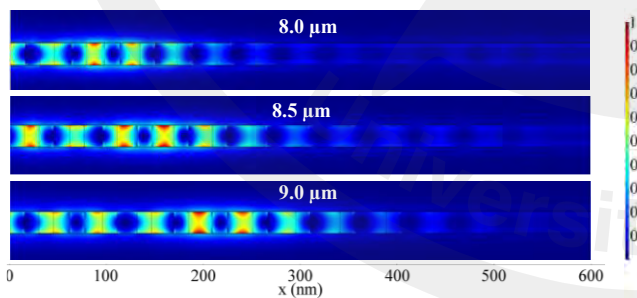
بدین ترتیب که طول موج نوری که پس از طی مسافتی از ساختار حبس شده است، با افزایش ولتاژ V_b می‌تواند طول بیشتری را در ساختار طی کند که این طول اضافی بستگی به میزان افزایش ولتاژ V_b دارد. بدین معنی که با افزایش تدریجی ولتاژ، نور حبس شده در ساختار به صورت تدریجی از موقعیت حبس شده خود خارج می‌شود. در شکل ۶، ولتاژ اعمالی برای آزادسازی طول موج‌های حبس شده در ساختار نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای آزادسازی طول موج‌هایی که در ابتدای ساختار حبس شده‌اند، به ولتاژ بیشتری نیاز است.



(الف)



(ب)



(ج)

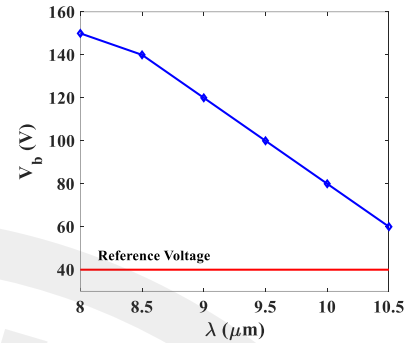
شکل ۵. (الف) سطح مقطع طولی براگ گریتینگ تدریجی مبتنی بر موجبر صفحات موازی مقارن پلاسمونی. (ب) ضریب کاهش سرعت بر حسب فرکانس به ازای مقادیر مختلف عرض شیار. (ج) پروفایل مجذور شدت میدان الکتریکی ساختار پیشنهادی به ازای سه طول موج مختلف و $V_b = 40 \text{ V}$.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تقدیر و تشکر خویش را از اعضای گروه پژوهشی الکترومغناطیس و فوتونیک دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی سهند به دلیل مشارکت مؤثر ایشان در مباحث علمی این مقاله اعلام می‌نمایند.

مراجع

- [1] T.F. Krauss, "Why do we need slow light?" *Nature Photonics*, Vol. 2, No. 8, pp. 448, 2008.
- [2] R. Hao, et al., "Improved slow light capacity in graphene-based waveguide" *Scientific reports*, Vol. 5, pp. 15335, 2015.
- [3] Guo, X., et al., Slow light performance enhancement of graphene-based photonic crystal waveguide. *Physics Letters A*, 2019. **383**(16): p. 1983-1987.
- [4] S. He, Y. He, and Y. Jin, "Revealing the truth about 'trapped rainbow' storage of light in metamaterials" *Scientific reports*, Vol. 2: pp. 583, 2012.
- [5] D. Janner, et al., "Slow light in periodic superstructure Bragg gratings" *Physical Review E*, Vol. 72, No. 5, pp. 056605, 2005.
- [6] L. Chen, et al., "Trapping of surface-plasmon polaritons in a graded Bragg structure: Frequency-dependent spatially separated localization of the visible spectrum modes" *Physical Review B*, Vol. 80, No. 16, pp. 161106, 2009.
- [7] Q. Bao, H. Hoh, and Y. Zhang, *Graphene Photonics, Optoelectronics, and Plasmonics*. CRC Press, 2017.
- [8] Wang, Z., et al., *Influence of Cu dopant on the electronic and optical properties of graphene-like ZnO monolayer*. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2020. **115**: p. 113702.
- [9] P. Tassin, et al., "A comparison of graphene, superconductors and metals as conductors for metamaterials and plasmonics" *Nature Photonics*, Vol. 6, No. 4, pp. 259, 2012.
- [10] H. Lu, et al., "Graphene-based active slow surface plasmon polaritons" *Scientific reports*, Vol. 5, pp. 8443, 2015.
- [11] P.-Y. Chen, and A. Alu, "Atomically thin surface cloak using graphene monolayers" *ACS nano*, Vol. 5, No. 7, pp. 5855-5863, 2011.
- [12] F. Jabbarzadeh, M. Heydari, and A. Habibzadeh-Sharif, "A comparative analysis of the accuracy of Kubo formulations for graphene plasmonics" *Materials Research Express*, Vol. 6, No. 8, pp. 086209, 2019.
- [13] E.V. Castro, et al., "Biased bilayer graphene: semiconductor with a gap tunable by the electric field effect" *Physical review letters*, Vol. 99, No. 21, pp. 216802, 2007.
- [14] K.I. Bolotin, et al., "Ultrahigh electron mobility in suspended graphene" *Solid State Communications*, Vol. 146, No. 9-10, pp. 351-355, 2008.
- [15] S. He, X. Zhang, and Y. He, "Graphene nano-ribbon waveguides of record-small mode area and ultra-high effective refractive indices for future VLSI" *Optics express*, Vol. 21, No. 25, pp. 30664-30673, 2013.
- [16] M. Nevière, "Bragg-Fresnel multilayer gratings: electromagnetic theory" *JOSA A*, Vol.11, No. 6, pp. 1835-1845, 1994.
- [17] R. Kashyap, *Fiber bragg gratings*. Academic press, 2009.
- [18] S. Ye, et al., "Graphene-spacer-grating-based structure to realize tunable mid-infrared narrow-band plasmonically induced transparency and slow light effect" *Applied Physics A*, Vol. 123, No. 10, pp. 637, 2017.



شکل ۶. ولتاژ مورد نیاز برای آزادسازی طول موج‌های حبس شده در ساختار. خط قرمز نشان دهنده ولتاژ مرجعی است که به ازای آن تمامی طول موج‌هایی که داخل پهنای باند کاری هستند، در ساختار حبس شده‌اند.

در نهایت، مطابق جدول ۱، نتایج به دست آمده را با نتایج مرجع [۱۸] مورد مقایسه قرار داده‌ایم. همانطور که می‌دانیم، کاهش ابعاد ساختارهای پلاسمونی در مدارهای مجتمع نوری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. مطابق جدول ۱، طول ساختار طراحی شده در این مقاله در حدود ۳۰٪ طول ساختار طراحی شده در [۱۸] است. از طرفی، ضریب کاهش سرعت و پهنای باند کاری ساختار طراحی شده در این مقاله به ترتیب بیش از ۱/۵ برابر و ۳/۵ برابر قطعه طراحی شده در [۱۸] هستند.

جدول ۱. مقایسه نتایج به دست آمده در این مقاله با نتایج مرجع [۱۸].

ساختار	طول ساختار	ضریب کاهش سرعت	پهنای باند کاری
مرجع [۱۸]	بیشتر از ۲ میکرومتر	حداکثر ۴۵۰	۰/۷ میکرومتر
این مقاله	۶۲۰ نانومتر	حداکثر ۶۹۰	۲/۵ میکرومتر

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک موجبر جدید پلاسمونی گرافنی برای کاهش سرعت نور و حبس نور طراحی شد. با استفاده از این ساختار، سرعت نور با ضریب کاهش سرعت ۶۹۰ در محدوده فرکانسی مادون قرمز میانی با پهنای باند ۲/۵ میکرومتر به خوبی کاهش یافت. امواج SPP با طول موج مشخص در این ساختار منتشر شده و سرعت آن‌ها به تدریج کاهش یافته و در نهایت، در موقعیت مکانی متناظر با عمق گریتینگ خود حبس می‌شوند. تنظیم‌پذیری و آزادسازی طول موج‌ها در این ساختار به لطف ویژگی تنظیم‌پذیری گرافن با استفاده از پتانسیل شیمیایی متغیر آن فراهم شده است.