

شیلد الکترومغناطیسی تنظیم‌پذیر بر پایه ساختارهای متناوب گرافنی در فرکانس‌های تراهرتز

عرفان دژبند^۱، کارشناسی ارشد؛ حمیدرضا کرمی^۲، استادیار؛ سید منوچهر حسینی پیلانگرگی^۳، استادیار

۱ - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بوعلی‌سینا - همدان - ایران - e.dezband94@basu.ac.ir

۲ - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بوعلی‌سینا - همدان - ایران - hamidr.karami@basu.ac.ir

۳ - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه بوعلی‌سینا - همدان - ایران - m.hosseini@basu.ac.ir

چکیده: با کشف ماده دوبعدی گرافن، ساخت و پیاده‌سازی مدارهای الکترونیکی در فرکانس‌های تراهرتز و نوری سرعت بیشتری پیدا کرده است. بنابراین مبحث شیلد الکترومغناطیسی در مدارهای تراهرتز و کاهش اثرات مخرب بخش‌های مختلف مدار بر یکدیگر حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از ساختارهای متناوب گرافنی، دو نوع شیلد الکترومغناطیسی در فرکانس تراهرتز پیشنهاد می‌شود. با توجه به قابلیت تنظیم‌پذیری رسانایی در گرافن، می‌توان شیلدهای پیشنهادی را در فرکانس کاری موردنظر تنظیم کرد. برای تسریع محاسبات ضریب کارایی شیلد، ابتدا مدلی مداری به فرم بسته برای ساختار گرافنی پیشنهاد شده و سپس با استفاده از روش خط انتقال کارایی شیلد محاسبه می‌شود. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از نرم‌افزار تجاری CST-MWS دقت و سرعت بالای روش خط انتقال را نشان می‌دهد. در انتها تأثیر عواملی مانند تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌های SiO_2 ، پهنای نوارهای گرافن، فاصله بین دو سلول گرافن، تأثیر انرژی فرمی‌های مختلف و تابش مایل بر کارایی شیلد ساختارهای پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته است که باعث می‌شود اطلاعات جامعی برای طراحی شیلد در اختیار خوانندگان محترم قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: شیلد امواج الکترومغناطیسی، ساختارهای متناوب گرافنی، گرافن، طیف تراهرتز، مدل مداری معادل.

Tunable Electromagnetic Shield Using Periodic Graphene-Based Structures in the Terahertz Regime

Erfan Dezhband, Master of Science¹; Hamidreza Karami, Assistant Professor²; Seyed Manouchehr Hoseini, Assistant Professor³

1- Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: e.dezband94@basu.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: hamidr.karami@basu.ac.ir

3- Department of Electrical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, Email: m.hosseini@basu.ac.ir

Abstract: Since graphene discovery, designing and implementation of electronic circuits have been developed in the THz and optical frequencies to achieve ultrafast responses. Thus, electromagnetic shielding due to its protection effects against disturbances caused by adjacent elements has emerged as a vital issue in circuit designing. In this paper, two types of electromagnetic shields are proposed in the THz regime. Regarding the adjustability of graphene's conductivity, one can easily tune the frequency response in order to adapt it with the frequency range in which their circuit works. In order to accelerate the computation of shield efficiency factor, firstly an equivalent circuit model is proposed as a closed-form expression, and then shield efficiency can be achieved using transmission line model. Comparisons indicate that the results derived from the proposed method are in high accordance with those of CST-MWS commercial software. Finally the effects of the number of layers, the thickness of SiO_2 layers, the width of graphene ribbons, the gap between the two individual cells, Fermi energies, and oblique incident on the shielding effectiveness of the proposed structure are discussed in details for interesting readers.

Keywords: Electromagnetic shield, periodic graphene-based structures, graphene, terahertz regime, equivalent circuit model.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱

نام نویسنده مسئول: حمیدرضا کرمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - همدان - چهار باغ شهید مصطفی احمدی روشن - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی برق - حمیدرضا کرمی.

۱- مقدمه

امروزه با افزایش پهنای باند در تجهیزات الکترونیکی و مخابراتی، طراحی و ساخت مدارهای تراهرتز و گیگاهرتز [۱، ۲] و حفاظت آنها در مقابل امواج الکترومغناطیسی ناخواسته مورد توجه قرار گرفته است. برای حفاظت مدارهای تراهرتز از شیلدهای الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. شیلد ابزاری است که امواج الکترومغناطیسی را جذب کرده یا برگشت می‌دهد. نانوتیوب‌های کربنی و ترکیبات پلیمری ساخته شده از کربن به دلیل کاهش ابعاد ساختار شیلد از جمله موادی هستند که بسیار مورد توجه طراحان در فرکانس‌های تراهرتز قرار گرفته‌اند. این ترکیبات به صورت تحلیلی و تجربی در [۳] و در رنج فرکانسی گیگاهرتز بررسی شده‌اند.

گرافن ماده‌ای دوبعدی است که از نقطه نظر مکانیکی، الکترونیکی و نوری دارای خواص ویژه‌ای است [۴]. یکی از خواص گرافن تغییر رسانایی الکتریکی آن با تغییر سطح انرژی فرمی است که با کمک ولتاژ الکتریکی، میدان مغناطیسی خارجی و یا دوپینگ شیمیایی آن می‌توان این تغییر را ایجاد کرد. این موضوع سبب می‌شود تا گرافن دارای کاربردهای فراوانی در مخابرات نوری و الکترونیک شود. از جمله ادوات الکترونیکی و نوری ساخته شده توسط گرافن می‌توان به آنتن‌های گرافنی [۵]، جاذب‌های کامل گرافنی [۶، ۷]، بیوسنسورها [۸] و سنسورهای گرافنی [۹]، مدولاتورها [۱۰]، فیلترها [۱۱] و موجبرهای پلازمونیک بر پایه گرافن [۱۲] اشاره کرد.

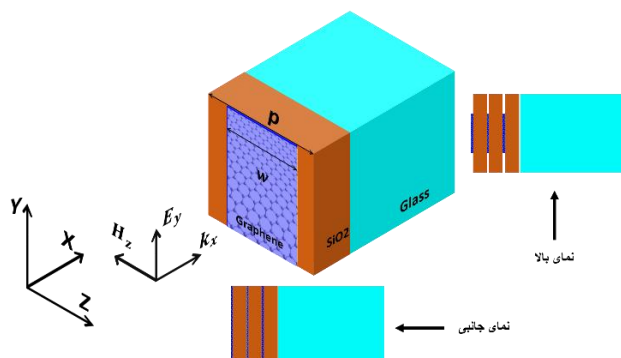
بنابراین با توجه به خواص منحصر به فرد گرافن که مختصری از آنها در بالا اشاره شد، طراحی شیلدهای الکترومغناطیسی در رنج فرکانسی تراهرتز بر پایه گرافن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای مثال در [۱۳]، شیلد الکترومغناطیسی پیشنهادی از صفحات کامل گرافنی بین دی‌الکتریک‌های SiO_2 که بر روی زیر لایه‌ای از جنس Si (شیشه) قرار دارند، پیشنهاد شده است. مقدار کارایی شیلد در این ساختار به صورت تحلیلی محاسبه شده است.

در مرجع [۳] از نانوتیوب‌های کربنی چندلایه برای ساخت شیلد استفاده شده است. این تحقیق دو نوع متفاوت از تکنولوژی ساخت برای نانوتیوب‌های کربنی چندلایه را مورد بررسی قرار داده است. شیلد تولید شده با روش ساخت مواد تحت فشار عمکرد مناسب‌تری نسبت به شیلد تولید شده با روش تزریق مواد دارد [۳]. در تحقیق [۱۴] نیز از ساختار چندلایه گرافنی برای ساخت یک شیلد الکترومغناطیسی شفاف استفاده شده که نشان می‌دهد برای شیلد با تعداد ۱۲ لایه مقدار شیلد در فرکانس‌های تراهرتز (حدود یک تراهرتز) ۷۳٪ نسبت به شیلد تک‌لایه بیشتر می‌شود و عبور دهی نور نیز افزایش می‌یابد.

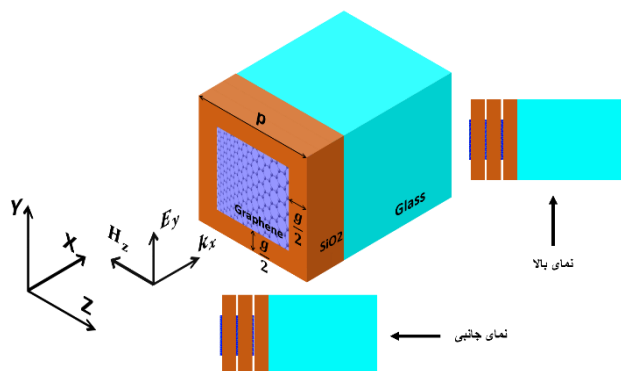
در این مقاله برای تحقق شیلدهای الکترومغناطیسی در فرکانس تراهرتز، ساختارهای گرافنی با الگوهای نواری و یا مستطیلی/مربعی شکل که هریک در بین لایه‌های دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند، پیشنهاد می‌شود. تفاوت این ساختارهای پیشنهادی با ساختار ارائه شده در [۱۳] و [۱۴] این است که به جای استفاده از صفحات گرافنی ساده از

الگوهای متناوب گرافنی استفاده شده که تک سلول آن در شکل ۱ و ۲ قابل مشاهده است. با تکرار این سلول‌ها به صورت متناوب در راستای z-y ساختار شیلد با الگوی متناوب گرافنی به دست می‌آید. هر یک از الگوهای متناوب گرافنی پیشنهاد شده خواص منحصر به فردی دارند که در این مقاله مورد بررسی و تحلیل کامل قرار می‌گیرند. برای محاسبه کارایی شیلد ساختارهای پیشنهادی، مدلی مدار پیشنهاد داده می‌شود. سپس از روش خط انتقال و مدل مداری پیشنهادی برای محاسبه کارایی شیلد الگوهای متناوب استفاده می‌شود. این موضوع سبب می‌شود تا سرعت شبیه‌سازی بدون کاهش دقت، افزایش یابد. برای بررسی صحت نتایج شبیه‌سازی از نرم‌افزار تجاری CST-MWS کمک گرفته شده است.

در بخش ۲ از این مقاله ساختارهای پیشنهادی برای ساخت شیلدهای الکترومغناطیسی در فرکانس تراهرتز بحث می‌شود. در بخش ۳ پس از بیان فرمول‌های رسانایی برای گرافن و نحوه مدل‌سازی آن، روش مرسوم خط انتقال برای تحلیل ساختارهای پیشنهادی و مدل مداری الگوهای گرافنی پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ۴ بررسی صحت روش خط انتقال به کمک نرم‌افزار تجاری CST-MWS انجام شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده و تأثیر عواملی مانند تعداد لایه‌ها، ضخامت لایه‌های SiO_2 ، پهنای نوارهای گرافن، فاصله بین دو سلول گرافن، تأثیر انرژی فرمی‌های مختلف و تابش مایل بر کارایی شیلد ساختارهای پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۱: یک سلول از ساختار شیلد چندلایه متشکل از نوارهای گرافنی و لایه‌های SiO_2 بر زیرلایه‌ای از جنس Si



در این قسمت فرمول‌های مربوط به محاسبه رسانایی گرافن به صورت مختصر آورده می‌شود تا در محاسبه امپدانس الگوهای متناوب نوری و مربع‌های گرافنی به کار گرفته شود.

۳-۴ رسانایی گرافن

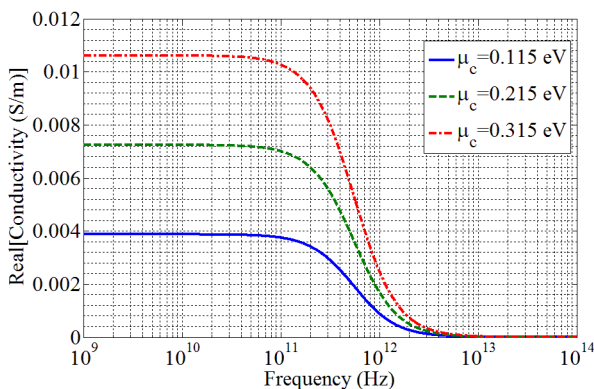
در مورد رسانایی گرافن مطالعات فراوانی انجام شده است که از جمله می‌توان به تحقیق‌های [۱۷-۱۹] اشاره کرد که از رابطه معروف Kobu برای محاسبه رسانایی گرافن استفاده کرده‌اند. در این رابطه رسانایی گرافن به دو بخش کلاسیک (intraband) و کوانتومی (interband) تقسیم می‌شود.

رابطه (۱) رسانایی گرافن را نشان می‌دهد که در این رابطه e بار الکتریکی، \hbar ثابت پلانک کاهش یافته، ω بسامد زاویه‌ای، T دما و k_B ثابت بولتزمن است. Γ نرخ پراکندگی الکترون و μ_c سطح انرژی فرمی است که با تغییر ولتاژ، سطح انرژی فرمی قابل تنظیم است؛

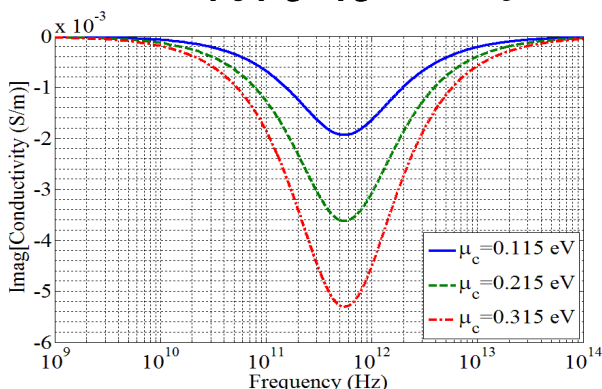
$$\sigma_{gr} = \frac{ie^2}{4\pi\hbar^2} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\omega + i2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega + i2\Gamma)\hbar} \right] + \frac{ie^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega + i2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(e^{-\mu_c/k_B T} + 1) \right] \quad (1)$$

با کمی دقت در رابطه (۱) می‌توان دریافت که در فرکانس‌های تراهرتز بخش کلاسیک نسبت به بخش کوانتومی غالب است که در نتیجه رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$\sigma_{gr} \cong \sigma_{intra} = \frac{ie^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega + i2\Gamma)} \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln(e^{-\mu_c/k_B T} + 1) \right] \quad (2)$$



شکل ۳: قسمت حقیقی رسانایی گرافن برای μ_c های مختلف



شکل ۲: یک سلول از ساختار شیلد چندلایه متشکل از مربع‌های گرافنی و لایه‌های SiO2 بر زیرلایه‌ای از جنس Si

۲- ساختار شیلد الکترومغناطیسی

در این مقاله دو الگوی متناوب گرافنی مورد بررسی قرار گرفته است که هر یک از آنها به صورت تک سلول در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. با تکرار این سلول‌ها به صورت متناوب در راستای z-y ساختار شیلد با الگوی متناوب گرافنی به دست می‌آید. باید به این نکته توجه کرد که در محاسبه امپدانس الگوهای گرافنی، دوره تناوب (p) و فاصله گرافن بین دو سلول (w در شکل ۱ و g در شکل ۲) تأثیر قابل توجهی بر مقدار شیلد دارند.

در سلول‌های پیشنهادی، الگوی متناوب گرافنی و SiO2 به صورت لایه‌لایه بر دی‌الکتریک از جنس Si قرار گرفته‌اند. ثابت گذردهی SiO2 برابر $\epsilon_{SiO2} = 3/9$ و گذردهی Si برابر با $\epsilon_f = 7$ در نظر گرفته می‌شود. ضخامت SiO2 و Si به ترتیب برابر ۵۰ نانومتر و ۵۰۰ میکرومتر فرض می‌شود.

شکل ۱ یک سلول از ساختار شیلد سه لایه متشکل از نوارهای گرافنی و لایه‌های SiO2 را نشان می‌دهد که دوره تناوب w عرض نوار است. شکل ۲ یک سلول از ساختار شیلد سه لایه متشکل از مربع‌های گرافنی و لایه‌های SiO2 را نشان می‌دهد که دوره تناوب g فاصله بین دو مربع است. لازم‌به‌ذکر است که ساختارهای شیلد نشان‌داده‌شده در شکل ۱ و ۲ برای اولین بار پیشنهاد می‌شود. در عمل برای ساخت گرافن دوبعدی آن را بر روی لایه‌هایی از SiO2 نشر می‌دهند. بنابراین در شیلدهای تنظیم‌پذیر پیشنهادی نیز از لایه‌های SiO2 استفاده‌شده تا نتایج تحلیلی به آزمون‌های آزمایشگاهی نزدیک باشد. باید به این نکته توجه کرد که بایاس DC (برای تغییر رسانایی گرافن و در نتیجه آن تنظیم شیلد در فرکانس‌های دلخواه) در ساختار نوری شکل ۱ راحت‌تر انجام می‌شود. در شیلد مربعی شکل ۲ هر سلول گرافن نیاز به یک بایاس DC مجزا دارد که این موضوع سبب می‌شود مدارها بایاس برای شکل ۲ بسیار پیچیده شود در حالی که در شکل ۱ برای هر نوار تنها یک بایاس DC نیاز می‌شود. این موضوع در عمل بسیار مهم است، زیرا تعداد گیت‌ها و منابع ولتاژ کاهش می‌یابد.

۳- مدل مداری ساختارهای پیشنهادی

در این بخش ابتدا روش استخراج مدل مداری ساختارهای پیشنهادی بیان شده و سپس به کمک روش مرسوم خط انتقال [۱۵] کارایی شیلد محاسبه می‌شود. در زمینه محاسبه امپدانس الگوهای متناوب، مقالات متنوعی منتشر شده است. باتوجه به تحقیق [۱۶] می‌توان امپدانس نوارها و مربع‌های گرافنی را برحسب دوره تناوب این الگوها و فاصله بین دو مربع، پهنای نوارها و دیگر پارامترها از جمله رسانایی گرافن بیان کرد.

$$E_t = E_{tx}^{TM} \hat{x} + E_{ty}^{TM} \hat{y} + E_{tz}^{TE} \hat{z} \quad (7)$$

که در آن $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ بردارهای یکه در مختصات کارتزین هستند. باتوجه به رابطه (۷) موج عبوری در سه جهت محور مختصات قابل تعریف است. اگر موج تابشی با زاویه قطبش و تابش φ و θ بتابد باتوجه به رابطه (۸) می‌توان آن را به دو موج TM و TE تجزیه کرد [۱۵].

$$E_{iy}^{TM} = E_i \cos\varphi \cos\theta \quad (8\text{-الف})$$

$$E_{iz}^{TE} = E_i \sin\varphi \quad (8\text{-ب})$$

در ادامه با استفاده از رابطه (۸) می‌توان موج تابشی را به دو قطبش TM و TE و دو جهت y و z به‌صورت زیر تفکیک کرد.

$$E_{ix}^{TM} = E_{iy}^{TM} \tan\theta \quad (9\text{-الف})$$

$$E_{iy}^{TM} = \Psi^{TM} E_{iy}^{TM} \quad (9\text{-ب})$$

$$E_{iz}^{TE} = \Psi^{TE} E_{iz}^{TE} \quad (9\text{-ج})$$

با استفاده از رابطه‌های (۹-ب) و (۹-ج) می‌توان موج تابشی را به موج عبوری، با ضریب انتقال موج Ψ نسبت داد که این ضریب باتوجه به [۱۷] در رابطه (۱۰) بیان شده است.

$$\Psi^{TM} = \frac{2}{\Phi_{11} + \Phi_{12}^{TM} / \eta_0 + \eta_0 \Phi_{21} + \Phi_{22}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) η_0 امپدانس مشخصه خلأ و Φ_{11} تا Φ_{22} ضرایب ماتریس انتقال ورودی-خروجی کل است که باتوجه به [۱۸] در رابطه (۱۱) برای m امین لایه از N لایه آورده شده است.

$$[\Phi_m^{TM}] = \begin{bmatrix} \cosh(B_m L_m) & \eta_m^{TM} \sinh(B_m L_m) \\ \sinh(B_m L_m) / \eta_m^{TM} & \cosh(B_m L_m) \end{bmatrix} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱) η_m امپدانس مشخصه لایه m ، $B_m L_m$ طول لایه m ام و ضرب انتقال مختلط آن لایه است. باتوجه به مدل خط انتقال و مرجع [۱۷] ماتریس ورودی-خروجی کل برای یک ساختار چندلایه از ضرب ماتریس ورودی-خروجی برای لایه اول تا آخر حاصل می‌شود.

$$[\Phi_{Total}^{TM}] = \prod_{m=1}^N [\Phi_m^{TM}] \quad (12)$$

B_m نیز در رابطه (۱۳) آورده شده است که در آن θ_m زاویه تابش بین دو لایه $(m-1)$ ام و (m) ام است که باتوجه به قانون Snell مطابق رابطه (۱۴) قابل محاسبه است.

$$B_m = iw \left(\frac{\sqrt{\epsilon_m}}{c_0} \right) \cos\theta_m \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) ϵ_{rm} گذردهی لایه (m) ام و c_0 سرعت نور در خلأ است.

$$\sin\theta_m = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\epsilon_m + \sigma_m / (iw \epsilon_0)}} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) θ_0 زاویه تابش اولیه و ϵ_{rm} گذردهی لایه (m) ام و σ_m رسانایی لایه (m) ام است.

بنابراین الگوریتم محاسبه کارایی شیلد به‌صورت زیر بیان می‌شود:

الف) ابتدا امپدانس لایه‌های الگودار گرافنی به‌کمک رابطه‌های (۳) یا

(۴) محاسبه می‌شود. ب) به‌کمک رابطه (۱۱) ماتریس انتقال هر لایه

شکل ۴: قسمت موهومی رسانایی گرافن برای μ_c های مختلف

در شکل ۳ قسمت حقیقی و در شکل ۴ قسمت موهومی رسانایی گرافن باتوجه به رابطه (۲) برحسب فرکانس برای چند μ_c مختلف رسم شده که با افزایش سطح انرژی فرمی مقدار حقیقی و اندازه قسمت موهومی رسانایی گرافن افزایش می‌یابد. در بازه فرکانسی ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز، قسمت حقیقی و موهومی رسانایی، به شدت وابسته به فرکانس است در صورتی که این وابستگی در فرکانس دیگر بسیار ضعیف‌تر می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که رسانایی گرافن را به‌راحتی می‌توان با تغییر μ_c تنظیم کرد.

۳ ۴ مدل خط انتقال

رابطه‌های (۳) و (۴) امپدانس نوارهای گرافنی را باتوجه تحقیق [۱۶] در یک ساختار متناوب با دوره تناوب p و عرض نوار w برحسب پارامترهای مختلف با دو قطبش TM و TE بیان می‌کند. در رابطه‌های (۳) و (۴)، α یک ضریب است که در رابطه (۵) تعریف شده، η_{eff} امپدانس مشخصه مؤثر، k_0 عدد موج در فضای آزاد، k_{eff} عدد موج مؤثر و θ زاویه تابش است.

$$Z_{gr}^{TE} = \frac{p}{(p-w)\sigma_{gr}} + i \frac{\eta_{eff}}{2} \alpha \quad (3)$$

$$Z_{gr}^{TM} = \frac{p}{(p-w)\sigma_{gr}} + i \frac{\eta_{eff}}{2} \alpha \left(1 + \frac{k_0}{k_{eff}} \sin^2 \theta \right) \quad (4)$$

$$\alpha = k_{eff} \ln(\csc(\frac{\pi w}{2p})) \quad (5)$$

در این مقاله کارایی شیلد برای ساختارهای پیشنهادی در شکل ۱ و ۲ به‌صورت تحلیلی محاسبه می‌شود. در محاسبه کارایی شیلد در این مقاله از یک موج صفحه‌ای منتشرشونده در جهت x با زاویه تابش و قطبش به‌ترتیب $0 < \theta < 90$ و $-90 < \varphi < 90$ استفاده می‌شود.

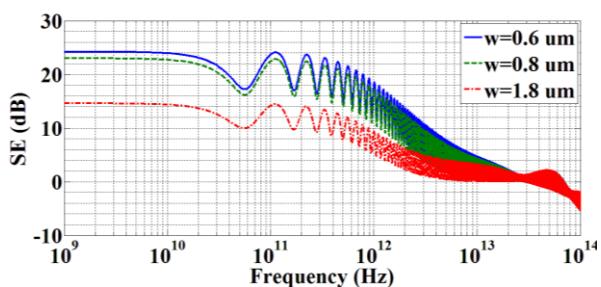
شیلد الکترومغناطیسی تجهیزی است که میدان الکترومغناطیسی را در یک محیط کاهش می‌دهد و سبب می‌شود تداخل الکترومغناطیسی پیش نیاید. برای ارزیابی عملکرد شیلدهای روش‌های مختلفی مانند [۱۳] وجود دارد که در این مقاله از رابطه (۶) استفاده شده است.

$$SE = 20 \log \left(\frac{E_i}{E_t} \right) \quad (6)$$

در رابطه (۶)، E_i و E_t به‌ترتیب موج تابشی (میدان الکتریکی بدون حضور شیلد) و موج عبوری (میدان الکتریکی در حضور شیلد) از ساختار هستند. بنابراین تقسیم این دو کمیت برهم به‌سادگی معیاری از کارایی شیلد در تضعیف یا حذف میدان الکتریکی است. هر چه مقدار عددی این تقسیم بیشتر شود یعنی میدان الکتریکی در حضور شیلد تضعیف بیشتری یافته، پس شیلد بهتر عمل کرده است و در نتیجه کارایی آن بیشتر است. موج عبوری را در حالت کلی می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

ساختارهای متناوب گرافنی نواری و مربعی شکل پیشنهادی، تغییرات پارامترهای مختلف این شیلدها از جمله، دوره تناوب ساختار (p) ، عرض نوار (w) یا فاصله از المان مجاور (g) ، انرژی فرمی (μ_c) و غیره بر میزان کارایی شیلدها محاسبه و گزارش می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده در فرآیند طراحی شیلدهای الکترومغناطیسی اهمیت دارند.

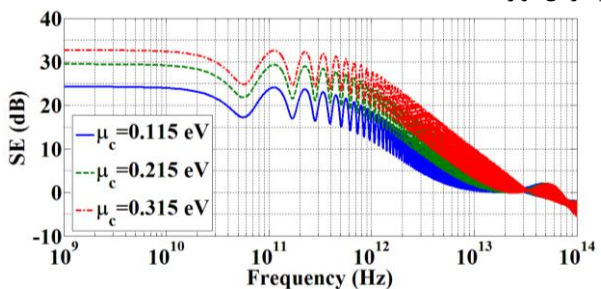
در تحلیل ساختارهای شیلد در این بخش ضخامت SiO_2 و Si به ترتیب برابر ۵۰ نانومتر و ۵۰۰ میکرومتر و ضریب گذردهی آنها نیز به ترتیب ۷ و ۳/۹ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶: کارایی شیلد ساختار نواری شکل (۱) برای قطبش TM برحسب فرکانس برای دوره تناوب $p=2 \mu\text{m}$ و سه عرض مختلف ۰/۱۸، ۰/۱۶ و ۱/۶ میکرومتر

۴-۴ بررسی پارامترهای مختلف بر کارایی شیلد در ساختارهای متناوب گرافنی نواری شکل

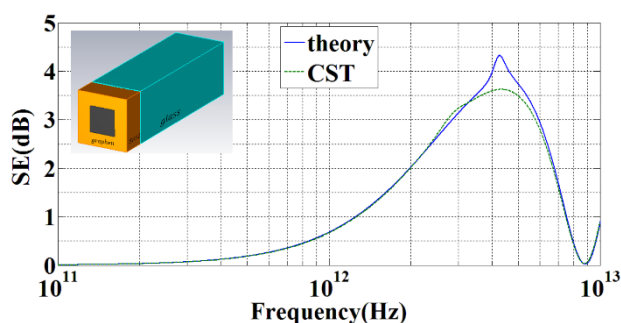
شکل ۶ کارایی شیلد در برابر امواج الکترومغناطیسی با قطبش TM برحسب فرکانس برای نوارهای گرافنی با دوره تناوب $p=2 \mu\text{m}$ ، $\mu_c = 0.115 \text{ eV}$ و سه مقدار مختلف عرض نوار یعنی، عرض‌های ۰/۱۸، ۰/۱۶ و ۱/۶ میکرومتر را نشان می‌دهد. این ساختار از ۳۰ لایه SiO_2 /گرافن که بروی زیرلایه‌ای از Si قرار گرفته است، تشکیل شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش عرض نوار کارایی شیلد کاهش می‌یابد. برای مثال با افزایش عرض نوار از ۰/۱۶ تا ۱/۶ میکرومتر کارایی شیلد از ۱۸/۱۴ تا ۱۶/۹۲ دسی‌بل در فرکانس ۱ تراهرتز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۶ می‌توان گفت که نوارهای گرافنی با عرض ۰/۱۶ و ۰/۱۸ میکرومتر دارای کارایی شیلد بالای ۱۶ دسی‌بل تا حوالی فرکانس ۱ تراهرتز می‌باشند. از طرف دیگر در فرکانس‌های بالای ۱۰ تراهرتز کارایی شیلد ساختار نواری برای هر سه ساختار از دست می‌رود. این به آن معنی است که ساختار نواری در فرکانس‌های نوری گذردهی مناسبی دارد. لازم‌به‌ذکر است که در این شبیه‌سازی سایر پارامترها غیر از عرض نوار ثابت‌اند.



به‌صورت جداگانه به دست می‌آید. ج) با ضرب ماتریس انتقال هر لایه در هم یعنی رابطه (۱۲) ماتریس انتقال کل ساختار محاسبه می‌شود. د) با توجه به رابطه (۱۰)، با استفاده از ضریب ماتریس انتقال کل، ضریب Ψ به‌دست‌آمده که به کمک آن موج عبوری یا همان میدان الکتریکی در حضور شیلد محاسبه می‌شود. در پایان به کمک رابطه (۶) کارایی شیلد به دست می‌آید. لازم‌به‌ذکر است که در قطبش TE و TM این مراحل به‌صورت جداگانه انجام می‌شوند.

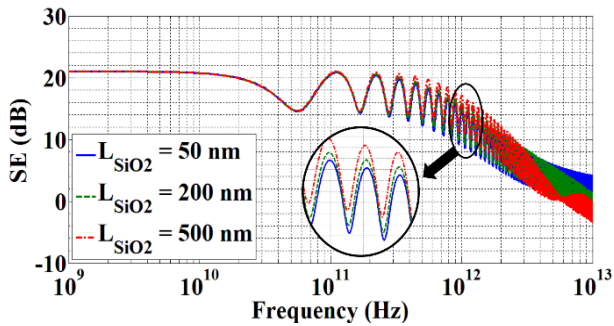
۴- شبیه‌سازی و نتایج تحلیلی

در شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی با نرم‌افزار CST-MWS و نتایج تحلیلی پیشنهادی برای ساختار مربع گرافنی تک لایه، SiO_2/Si /گرافن با یکدیگر مقایسه شده است. در این ساختار $g=1 \mu\text{m}$ ، $p=2 \mu\text{m}$ و سطح انرژی فرمی برای گرافن $\mu_c = 0.115 \text{ eV}$ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی و تحلیلی نشان داده شده در شکل ۵ برای ساختاری با ضخامت SiO_2 و Si به ترتیب ۱ و ۶ میکرومتر و یک لایه گرافن ۱ نانومتر مقایسه شده است. پس از تعریف ساختار متناوب در نرم‌افزار CST-MWS، تحلیل این ساختار در حوزه فرکانس با تعداد ۱۸۰۰۰ مش انجام شده است. برای این شبیه‌سازی شرایط مرزی متناوب (در راستای y-z) و شرایط مرزی باز (در راستای x) استفاده شده و پارامترهای ماتریس پراکندگی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند. این شبیه‌سازی روی یک سیستم کامپیوتر با حافظه 4GByte و دارای پردازشگر ۴ هسته‌ای انجام شده است. زمان انجام این شبیه‌سازی حدود ۱۰ دقیقه است. مقدار خطا نیز در این شبیه‌سازی -40dB در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مقایسه نتایج شبیه‌سازی CST-MWS و روش پیشنهادی در فرکانس ۰/۱ تا ۱۰ تراهرتز برای یک لایه SiO_2 /گرافن

لازم به ذکر است که این شبیه‌سازی برای یک لایه SiO_2 /گرافن انجام شده است و نمی‌توان آن را برای ساختارهای چندلایه به دلیل حجم محدود حافظه اجرا کرد. به‌عبارت‌دیگر ساختارهای چندلایه به حافظه و زمان شبیه‌سازی بسیار زیادتر نسبت به روش خط انتقال نیاز دارند. از آنجا که نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار CST-MWS تطابق مناسبی با روش تحلیلی پیشنهادی دارد از این پس تنها نتایج تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور بررسی عملکرد



شکل ۹: کارایی شیلد برای ساختار نوری با سه ضخامت متفاوت برای SiO₂ که به ترتیب برابر است با ۵۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ نانومتر

شکل ۹ کارایی شیلد با قطبش TM را برای ساختار نوارهای گرافنی و SiO₂، برای سه مقدار مختلف از ضخامت SiO₂ در سطح انرژی فرمی گرافن ۰/۱۱۵ الکترون‌ولت و عرض نوار ۰/۶ میکرومتر و دوره تناوب ۲ میکرومتر نشان می‌دهد. تعداد لایه‌ها نیز ۲۰ SiO₂/گرافن در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود کارایی شیلد تا فرکانس حدود ۰/۵ تراهرتز ثابت بوده و پس از آن با تغییر ضخامت SiO₂ کارایی شیلد افزایش یا کاهش می‌یابد. برای مثال در فرکانس ۱ تراهرتز کارایی شیلد از ۱۴/۸۴ به ۱۷/۱۳ دسی‌بل افزایش می‌یابد.

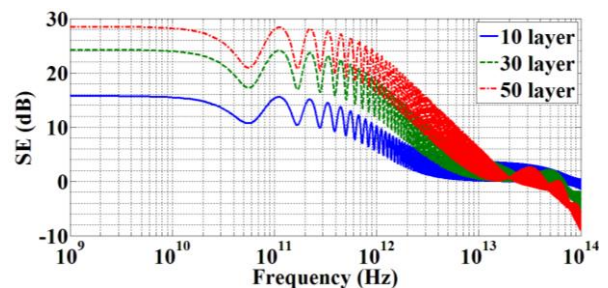
۴۴ بررسی پارامترهای مختلف بر کارایی شیلد در ساختارهای متناوب گرافنی مربعی شکل

شکل ۱۰ کارایی شیلد در برابر امواج الکترومغناطیسی با قطبش TM را برحسب فرکانس برای مربع‌های گرافنی شکل ۲ با دوره تناوب ۲ میکرومتر و انرژی فرمی ۰/۱۱۵ الکترون‌ولت و سه مقدار مختلف برای فاصله بین مربع‌ها ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۶ میکرومتر را نشان می‌دهد. این ساختار از ۲۰ لایه SiO₂/گرافن که روی زیرلایه‌ای از Si قرار گرفته، تشکیل شده است.

عمده تفاوت این ساختار با ساختار قبلی، نوارهای گرافنی نشان داده شده در شکل ۱ این است که شیلد در پهنای باند فرکانسی خاصی انجام می‌شود که باتوجه به پارامترهای مختلف این پهنای باند و فرکانس مرکزی آن قابل تنظیم است. یعنی می‌توان از آن به‌عنوان یک فیلتر میان‌گذر با قابلیت تنظیم پذیری بالا استفاده کرد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است با افزایش g مقدار شیلد کاهش می‌یابد، همچنین افزایش g باعث شیفت در فرکانس مرکزی شیلد نیز می‌شود. برای مثال با افزایش فاصله دو المان مجاور (g) از ۰/۶ به ۱/۶ میکرومتر، فرکانس مرکزی شیلد از ۳/۳۹ به ۷/۰۲ تراهرتز انتقال می‌یابد و کارایی شیلد از ۲۱/۲۸ تا ۱۱/۸۷ دسی‌بل در فرکانس مرکزی آن کاهش می‌یابد. باتوجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت که مربع گرافنی با فاصله دو المان مجاور (g) ۰/۶ میکرومتر دارای کارایی شیلد همواره بالای ۱۴ دسی‌بل از فرکانس ۳/۲۳ تا ۳/۵۵ تراهرتز می‌باشد.

شکل ۷: کارایی شیلد ساختار نوری شکل (۱) برای قطبش TM برحسب فرکانس برای دوره تناوب $w = 2 \mu m$ ، $\varphi = 0.6 \mu m$ و سه انرژی فرمی مختلف ۰/۱۱۵، ۰/۲۱۵ و ۰/۳۱۵ الکترون‌ولت

شکل ۷ کارایی شیلد در ساختار نوری شکل ۱ برای سه سطح انرژی فرمی ۰/۱۱۵، ۰/۲۱۵، ۰/۳۱۵ الکترون‌ولت و عرض ۰/۶ میکرومتر را نشان می‌دهد. این ساختار از ۳۰ لایه SiO₂/گرافن که بروی زیرلایه‌ای از Si قرار گرفته است، تشکیل می‌شود. از شکل ۷ مشخص است، با افزایش μ_c مقدار شیلد افزایش می‌یابد. برای مثال با افزایش انرژی فرمی از ۰/۱۱۵ تا ۰/۳۱۵ الکترون‌ولت، کارایی شیلد از حدود ۲۱/۵ تا ۳۰/۵ دسی‌بل در فرکانس ۰/۵۶ تراهرتز افزایش می‌یابد. انرژی فرمی (μ_c) از طریق ولتاژ بایاس به نوارهای گرافنی قابل تنظیم است. ساخت الگوهای نوری و استفاده از آنها برای تنظیم‌پذیری شیلد ساده‌تر از الگوی مربعی است که علت آن اتصال نوارها و ساده‌بودن اعمال ولتاژ برای تغییر μ_c می‌باشد.

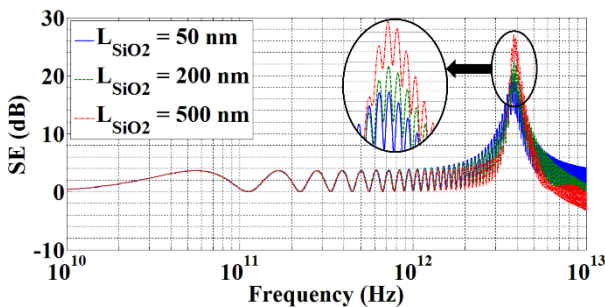


شکل ۸: کارایی شیلد برای سه ساختار نوری با تعداد لایه‌های مختلف. تعداد لایه‌ها گرافن/SiO₂ در این ساختار برابر است با ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ لایه

برای بررسی اثر تعداد لایه‌های SiO₂/گرافن بر روی کارایی شیلد ساختار متناوب گرافنی نوری شکل، سه ساختار مختلف با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ لایه فرض می‌شود. در تمامی این سه ساختار سطح انرژی فرمی در گرافن ۰/۱۱۵ الکترون‌ولت، عرض نوار ۰/۶ میکرومتر و دوره تناوب آن ۲ میکرومتر است. شکل ۸ مقدار کارایی شیلد با قطبش TM برحسب فرکانس را برای سه ساختار با تعداد لایه‌های SiO₂/گرافن مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش تعداد لایه‌های SiO₂/گرافن کارایی شیلد افزایش می‌یابد. برای مثال با افزایش تعداد لایه‌های SiO₂/گرافن از ۱۰ تا ۵۰، کارایی شیلد از ۱۲/۵۹ تا ۲۶/۴۶ دسی‌بل در فرکانس ۰/۵۶ تراهرتز افزایش یافته است.

برای بررسی اثر تعداد لایه‌های SiO_2 /گرافن بر روی کارایی شیلد ساختارهای متناوب بر پایه گرافن مربعی شکل، سه ساختار مختلف با ۱۰، ۳۰ و ۵۰ لایه در نظر گرفته می‌شود. در تمامی این سه ساختار سطح انرژی فرمی در گرافن 0.115 الکترون‌ولت، فاصله دو المان مجاور (g) 0.6 میکرومتر و دوره تناوب ساختار 2 میکرومتر در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۲ مقدار کارایی شیلد با قطبش TM برحسب فرکانس برای سه ساختار با تعداد لایه‌های SiO_2 /گرافن مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است کارایی شیلد در فرکانس مرکزی شیلد با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد. فرکانس مرکزی نیز مقدار اندکی با افزایش تعداد لایه‌ها به سمت راست جابجا می‌شود. برای مثال با افزایش تعداد لایه‌های SiO_2 /گرافن از ۱۰ تا ۵۰، کارایی شیلد از $15/62$ تا $33/44$ دسی‌بل در فرکانس مرکزی افزایش یافته و فرکانس مرکزی نیز از $3/28$ به $3/39$ تراهرتز انتقال می‌یابد.

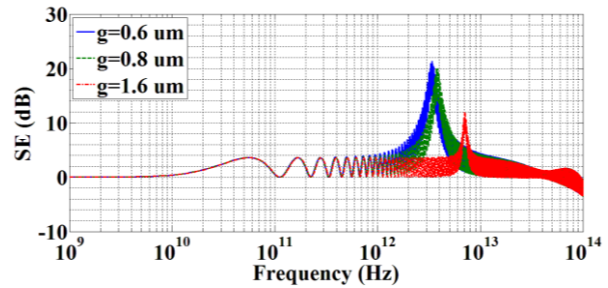
شکل ۱۳ کارایی شیلد با قطبش TM را برای ساختار مربع‌های گرافنی شکل ۲، برای سه مقدار مختلف از ضخامت SiO_2 ، سطح انرژی فرمی گرافن 0.115 الکترون‌ولت، فاصله دو المان مجاور $6/0$ (g) میکرومتر و دوره تناوب 2 میکرومتر نشان می‌دهد. تعداد لایه‌ها نیز ۲۰ فرض شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود کارایی شیلد با افزایش ضخامت SiO_2 افزایش یافته و فرکانس مرکزی آن به مقدار بسیار کمی جابجا می‌شود. برای مثال با افزایش ضخامت SiO_2 از ۵۰ به ۵۰۰ نانومتر کارایی شیلد از $21/28$ به $28/62$ دسی‌بل افزایش می‌یابد، همچنین فرکانس مرکزی نیز از $3/39$ به $3/49$ تراهرتز جابجا می‌شود.



شکل ۱۳: مقدار شیلد برای ساختار مربعی با سه ضخامت متفاوت برای SiO_2 که به ترتیب برابر است با ۵۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ نانومتر

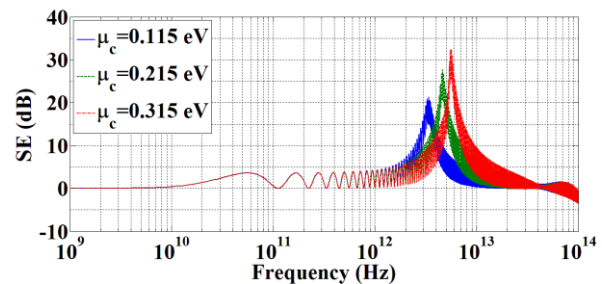
۴-۴ بررسی اثر زاویه تابش و مد تابشی بر کارایی شیلد

شکل ۱۴ و شکل ۱۵ کارایی شیلد در برابر امواج الکترومغناطیسی با قطبش TM برحسب فرکانس برای نوارهای گرافنی و مربع‌های گرافنی با دوره تناوب 2 میکرومتر، انرژی فرمی 0.115 الکترون‌ولت و عرض نوار 0.6 میکرومتر و فاصله دو مربع 0.6 میکرومتر را برای دو زاویه تابش مستقیم و 60 درجه نشان می‌دهند. باتوجه به لایه‌ای بودن ساختار زاویه تابش تأثیر چندانی بر مقدار شیلد ندارد. بنابراین یکی دیگر از قابلیت‌های ساختار شیلدهای پیشنهادی را می‌توان عدم



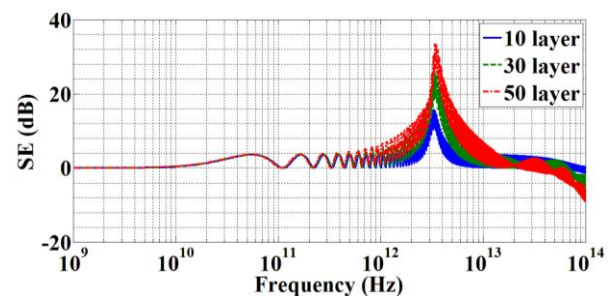
شکل ۱۰: کارایی شیلد امواج الکترومغناطیسی با قطبش TM برحسب فرکانس برای مربع‌های گرافنی با دوره تناوب 2 میکرومتر و سه مقدار مختلف فاصله دو المان مجاور g

شکل ۱۱ کارایی شیلد در ساختار مربعی شکل ۲ را برای سه سطح انرژی فرمی 0.115 ، 0.215 و 0.315 الکترون‌ولت و فاصله دو المان مجاور (g) 0.6 میکرومتر نشان می‌دهد. این ساختار از ۲۰ لایه SiO_2 /گرافن که به روی زیرلایه‌ای از جنس Si قرار گرفته، تشکیل شده است.



شکل ۱۱: شیلد برای سه سطح انرژی فرمی 0.115 ، 0.215 و 0.315 الکترون‌ولت و فاصله دو المان مجاور 0.6 میکرومتر

همان‌طور که مشخص با افزایش μ_c مقدار کارایی شیلد نیز افزایش یافته و فرکانس مرکزی شیلد نیز جابجا می‌شود. برای مثال با افزایش μ_c از 0.115 تا 0.315 الکترون‌ولت، فرکانس مرکزی شیلد (یعنی فرکانسی که دارای حداکثر کارایی شیلد است) از $3/39$ به $5/55$ تراهرتز جابجا می‌شود. کارایی شیلد نیز از $21/28$ به $32/38$ دسی‌بل در فرکانس مرکزی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ مشخص است که مربع گرافنی با 0.315 الکترون‌ولت دارای کارایی شیلد همواره بالای ۱۶ دسی‌بل در رنج فرکانس $5/16$ تا $6/02$ تراهرتز می‌باشد.

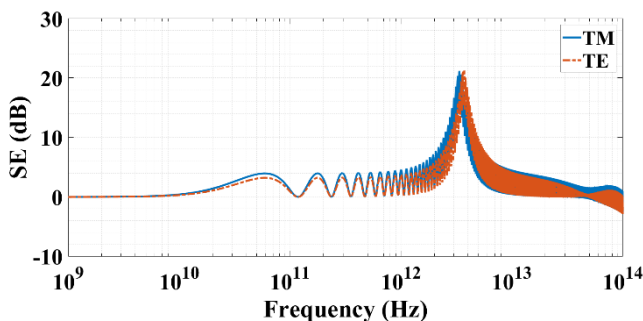


شکل ۱۲: مقدار شیلد برای سه ساختار مربعی با تعداد لایه‌های مختلف. تعداد لایه‌ها گرافن/ SiO_2 در این ساختار برابر است با ۱۰ و ۳۰ و ۵۰ لایه

شکل ۱۷ کارایی شیلد در برابر امواج الکترومغناطیسی برحسب فرکانس برای مربع‌های گرافنی با دوره تناوب ۲ میکرومتر، انرژی فرمی ۰/۱۱۵ الکترون‌ولت و فاصله دو مربع ۰/۶ میکرومتر را برای دو قطبش TE و TM با زاویه تابش ۶۰ درجه نشان می‌دهد. تنها تفاوت در تابش عبارت $1/(1-(0.5 \times (k_0/k_{eff}) \times \sin^2(\theta)))$ است [۱۶]. همان‌طور که مشاهده می‌شود قطبش TE و TM اثر کمی بر کارایی شیلد دارد. بنابراین شیلدهای پیشنهادی در قطبش‌های TE و TM نیز اختلاف کمی دارند. این موضوع برای ساختارهای نواری شکل در شکل ۱۶ و برای ساختارهای مربعی شکل در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود.

۵- ختیجه

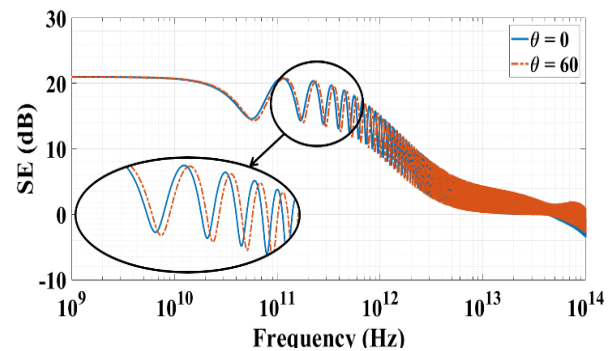
در این مقاله دو ساختار متناوب بر پایه گرافن یکی به شکل نوار و دیگری به شکل مربع‌های گرافنی به‌عنوان شیلد امواج الکترومغناطیسی پیشنهاد شده است. استفاده از گرافن در ساخت شیلد سبب می‌شود تا بتوان شیلدی تنظیم‌پذیر باتوجه به نیاز به‌دست آورد. قابلیت تنظیم‌پذیری شیلدهای پیشنهادی نیز با شبیه‌سازی بررسی شد. مشاهده می‌شود با تغییر انرژی فرمی در گرافن که به‌راحتی با تغییر بایاس DC بر روی گرافن امکان‌پذیر است، می‌توان فرکانس مرکزی شیلدهای مربعی شکل را تغییر داد. این قابلیت در شیلدهای نواری دیده نمی‌شود. اثر تعداد لایه‌های $\text{SiO}_2/\text{گرافن}$ در ساختار شیلد، ضخامت SiO_2 ، فاصله بین المان‌ها و عرض نوار نیز بر روی کارایی شیلد ساختارهای پیشنهادی به‌صورت کامل بررسی شد. نتایج این محاسبات در طراحی شیلدهای الکترومغناطیسی در فرکانس تراهرتز سودمند است. برای محاسبه کارایی شیلد در این مقاله روش خط انتقال پیشنهاد شده است. تحلیلی بودن این روش سبب می‌شود تا بازده آن بسیار بالا باشد. برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار تجاری CST-MWS نیز استفاده شد. با بهره‌گیری از ساختارهای متناوب بر پایه گرافن می‌توان شیلدهای الکترومغناطیسی تنظیم‌پذیر در فرکانس‌های تراهرتز را طراحی کرده و از آنها در مدارهای مخابراتی و الکترونیکی تراهرتز استفاده کرد.



شکل ۱۷: مقدار شیلد برای ساختار مربعی با دو تابش TE, TM و زاویه تابش ۶۰ درجه

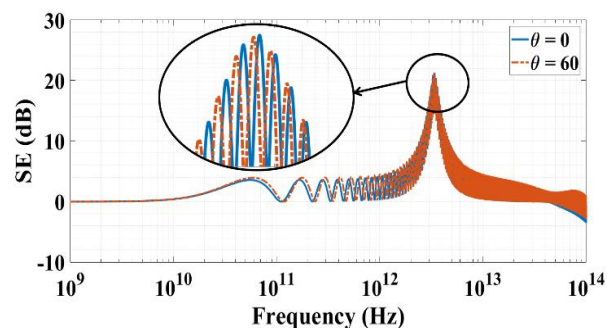
مراجع

تغییرپذیری کارایی شیلد در زاویه تابش‌های مایل دانست. این موضوع تا زاویه ۶۰ درجه برای قطبش TM در شکل ۱۴ برای ساختار نواری و در شکل ۱۵ برای ساختارهای مربعی مشاهده می‌شود.

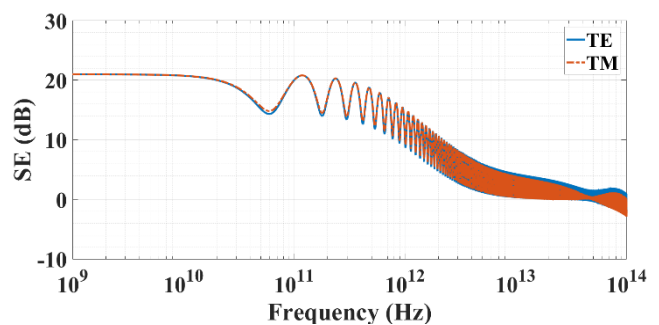


شکل ۱۴: مقدار شیلد برای ساختار نواری با دو زاویه تابش ۰ درجه و ۶۰ درجه

شکل ۱۶ کارایی شیلد در برابر امواج الکترومغناطیسی برحسب فرکانس برای نوارهای گرافنی با دوره تناوب ۲ میکرومتر، انرژی فرمی ۰/۱۱۵ الکترون‌ولت و عرض نوار ۰/۶ میکرومتر را برای دو قطبش TE و TM با زاویه تابش ۶۰ درجه نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، قطبش TE و TM اثر کمی بر شیلد دارد. این اختلاف کم به دلیل کوچک‌بودن عبارت $1-(k_0/k_{eff}) \times \sin^2(\theta)$ در رابطه (۴) بر است.



شکل ۱۵: مقدار شیلد برای ساختار مربعی با دو زاویه تابش ۰ درجه و ۶۰ درجه



شکل ۱۶: مقدار شیلد برای ساختار نواری با دو تابش TE, TM و زاویه تابش ۶۰ درجه

- [10] M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, et al., "A graphene-based broadband optical modulator," *Nature*, vol. 474, pp. 64-67, 2011.
- [11] A. Rycerz, J. Tworzydło, and C. Beenakker, "Valley filter and valley valve in graphene," *Nature Physics*, vol. 3, pp. 172-175, 2007.
- [12] J. T. Kim and S.-Y. Choi, "Graphene-based plasmonic waveguides for photonic integrated circuits," *Optics express*, vol. 19, pp. 24557-24562, 2011.
- [13] A. G. D'Aloia, M. D'Amore, and M. S. Sarto, "Terahertz shielding effectiveness of graphene-based multilayer screens controlled by electric field bias in a reverberating environment," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, pp. 628-636, 2015.
- [14] I. Baek, K. Ahn, B. Kang, S. Bae, B. Hong, D.-I. Yeom, et al., "Terahertz transmission and sheet conductivity of randomly stacked multi-layer graphene," *Applied Physics Letters*, vol. 102, p. 191109, 2013.
- [15] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic waves and antennas*: Rutgers University New Brunswick, NJ, 2002.
- [16] A. Yakovlev, G. Hanson, and A. Mafi, "High-impedance surfaces with graphene patches as absorbing structures at microwaves," *Proc. Metamaterials 2009*, 2009.
- [17] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, p. 064302, 2008.
- [18] G. W. Hanson, "Dyadic Green's functions for an anisotropic, non-local model of biased graphene," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, pp. 747-757, 2008.
- [19] V. Gusynin, S. Sharapov, and J. Carbotte, "Magneto-optical conductivity in graphene," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 19, p. 026222, 2006.
- [20] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*: John Wiley & Sons, 2005.
- [۱] پرویز امیری؛ محمود صیفوری؛ بابک آفرین؛ آوا هدایتی‌پور، «طراحی پیش تقویت‌کننده RGC کم نویز مدار مجتمع CMOS با پهنای باند 20 GHz و بهره 60 dB»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۲- شماره پیاپی ۷۶، صفحه ۱۵-۲۳، تابستان ۱۳۹۵.
- [۲] مهران نظری؛ جواد باوند حسنی، «طراحی یک تقویت‌کننده کم‌نویز کسکود ولتاژ پایین با خطینگی بالا به کمک روش تزویج مغناطیسی در باند 45 GHz»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲ - شماره پیاپی ۸۰، صفحه ۷۵۱-۷۶۰، تابستان ۱۳۹۶.
- [3] M. Arjmand, T. Apperley, M. Okoniewski, and U. Sundararaj, "Comparative study of electromagnetic interference shielding properties of injection molded versus compression molded multi-walled carbon nanotube/polystyrene composites," *Carbon*, vol. 50, pp. 5126-5134, 2012.
- [4] M.-S. Cao, X.-X. Wang, W.-Q. Cao, and J. Yuan, "Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding," *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 3, pp. 6589-6599, 2015.
- [5] T. Niu, W. Withayachumnankul, B. S.-Y. Ung, H. Menekse, M. Bhaskaran, S. Sriram, et al., "Experimental demonstration of reflectarray antennas at terahertz frequencies," *Optics express*, vol. 21, pp. 2875-2889, 2013.
- [6] R. Parvaz and H. Karami, "Far-infrared multi-resonant graphene-based metamaterial absorber," *Optics Communications*, vol. 396, pp. 267-274, 2017.
- [7] M. Roshanaei, E. Dezhband, H. Karami, and R. Parvaz, "Multi resonance perfect absorber based on graphene micro ribbons." *META 2016 CONFERENCE, MALAGA, 25 - 28 JULY 2016*.
- [8] Y. Shao, J. Wang, H. Wu, J. Liu, I. A. Aksay, and Y. Lin, "Graphene based electrochemical sensors and biosensors: a review," *Electroanalysis*, vol. 22, pp. 1027-1036, 2010.
- [9] P. K. Ang, W. Chen, A. T. S. Wee, and K. P. Loh, "Solution-gated epitaxial graphene as pH sensor," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 130, pp. 14392-14393, 2008.