



فصلنامه علمی ((دفاع هوافضایی))

دوره ۲، شماره ۲، شهریور ۱۴۰۲

عنوان مقالات

مقاله پژوهشی

محافظت از تجهیزات الکترونیکی در برابر امواج الکترومغناطیسی ku ($12GHz - 18GHz$) با استفاده از پلاسماهای تک لایه و چندلایه

سیدعلی حسینی مرادی^۱ حمیدرضا البرزنی^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران،

۲. گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده

طیف امواج الکترومغناطیسی در باند ku تأثیرات زیادی بر تجهیزات و نیروی انسانی دارد. برای محافظت از تجهیزات الکترونیکی در مقابل این طیف از امواج، روش‌های زیادی بکار رفته است. در این مقاله با استفاده از پلاسماهای سرد یکنواخت و غیریکنواخت که از سه لایه مستطیلی شکل تشکیل شده است استفاده می‌شود. هر لایه پلاسما دارای پارامترهای تفکیک شده مانند ضخامت، فرکانس برخورد، خاصیت مغناطیسی، چگالی متغیر و زاویه تابش موج می‌باشند. موج ورودی الکترومغناطیسی دارای قطبش p تحت زوایای مختلف در باند ku ($12GHz - 18GHz$) در نظر گرفته می‌شود. با حل معادلات موج و محاسبه ضریب پذیرفتاری $\tilde{\epsilon}$ در تک لایه و سه لایه پلاسمایی، مقدار بهینه مجموع جذب و انعکاس محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار ممتیکا نمودارها برحسب پارامترهای ذکر شده در تیغه تک لایه و تیغه سه لایه رسم می‌شوند و با استفاده از این نمودارها به مقایسه ضریب محافظت cop در حالت‌های تک لایه و سه لایه با در نظر گرفتن انعکاس‌های متوالی در موارد مغناطیسی و غیرمغناطیسی پرداخته می‌شود و نتایج مورد نظر ارائه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از پلاسماهای سه لایه ضریب cop را برای پهنای باند زیاد به سمت بهینه آن سوق می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

کلمات کلیدی:

پلاسما، باند ku، ضریب محافظت، پهنای باند، ضریب cop



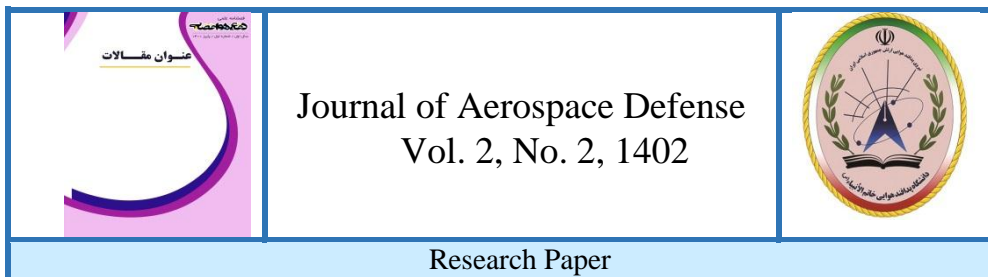
نویسنده مسئول:

سیدعلی حسینی مرادی
Physicplasma2011@gmail.com

استناد به مقاله: سیدعلی حسینی مرادی، علی البرزنی، محافظت از تجهیزات الکترونیکی در برابر امواج

الکترومغناطیسی ku ($12GHz - 18GHz$) با استفاده از پلاسماهای تک لایه و چندلایه، مجله علمی

پژوهشی دفاع هوافضایی دوره ۲، شماره ۲، شهریور ۱۴۰۲.



Protecting electronic equipment against electromagnetic waves of ku band using single and multilayer plasma

Seyed Ali Hosseini Moradi¹, Hamidreza Alborznia²,

1. Corresponding Author, Department of Physics, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

2. Department of Physics, Faculty of Basic Science, Khatam ol-Anbia (PBUH) University, Tehran, Iran.

Article Information

Accepted: 1402/05/22

Received: 1401/11/04

Keywords:

Plasma, Ku band,
Protection factor,
Bandwidth, cop
coefficient



Corresponding author:

S. A. Hosseini Moradi
Physicplasma2011@gmail.com

Abstract

The spectrum of electromagnetic waves in ku band has a great impact on equipment and manpower. Many methods have been used to protect electronic equipment against this range of waves. In this paper, uniform and non-uniform cold plasma consisting of three rectangular layers is used. Each plasma layer has different parameters such as thickness, impact frequency, magnetic property, variable density and wavelength of radiation. The electromagnetic input wave with p polarization is considered at different angles in the ku band. By solving the wave equations and calculating the acceptance coefficient in single and triple plasma layers, the optimal value of total absorption and reflection is calculated. Then, using Mathematica software, the diagrams are drawn according to the parameters mentioned in the single-layer blade and the three-layer blade. Using these diagrams, the cop protection coefficient in single-layer and three-layer states is compared by considering consecutive reflections in magnetic and non-magnetic cases, and the desired results are presented. The results show that using three-layer plasma leads the cop coefficient to its optimum for high bandwidth.

HOW TO CITE: H. Alborznia, S. A. Hosseini Moradi, Protecting electronic equipment against electromagnetic waves of ku band using single and multilayer plasma, Journal of Aerospace Defense Vol. 2, No. 2, 1402

۱- مقدمه

مطالعه اثرات امواج الکترومغناطیسی باند ku که اکثر رادارها در این محدوده فرکانسی رفتار می‌کنند از اهمیت زیادی برخوردار است. بعضی از دستگاه‌ها و تجهیزات الکترونیکی در مقابل این امواج بشدت آسیب‌پذیر می‌شود. بنابراین استفاده از یک محافظ که بتواند از ورود این امواج در این دستگاه‌ها کاربرد داشته باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. تاکنون محافظ‌های زیادی جهت این موارد استفاده شده است ولی محافظ‌های پلاسمایی می‌تواند پهنای زیادی از باند امواج الکترومغناطیسی را جذب و انعکاس دهد. پلازما با توجه به خواصی که دارد در شرایط آب و هوایی خاص مانند بارندگی و طوفان به‌عنوان محافظ زیردریایی‌ها، کشتی‌ها استفاده می‌گردد [۱]. تولید پلازما به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد که یکی از روش‌های مقرون به‌صرفه استفاده از تخلیه سد دی الکتریک است ساختار این تخلیه شامل دو الکتروود دی الکتریک می‌باشد که دست کم یکی از آنها با یک لایه از دی الکتریک پوشیده شده است. ضرورت یک یا چند لایه عایق بین دو الکتروود متصل به منبع تغذیه یکی از ساده‌ترین راه‌ها برای تشکیل تخلیه فشار اتمسفری غیرحرارتی است. همچنین در این کار با استفاده از یک مدل ساده تئوری و شبیه‌سازی معادلات موج در پلازما به صورت عددی نشان می‌دهیم که افزایش تعداد لایه‌ها در یک پلاسمای سرد مغناطیسی نقش مهمی در افزایش جذب، انعکاس و عبور دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند در ساخت محافظ‌های پلاسمایی بهینه برای کاربردهای مواد جاذب مورد استفاده قرار گیرد [۲].

۲- امواج در پلاسمای سرد مغناطیسی

اگر یک پلاسمای سرد و مغناطیسی با بسامد زاویه‌ای ω_p را در معرض امواج الکترومغناطیسی ω قرار دهیم مقدار گذردهی الکتریکی و مغناطیسی و ضریب شکست آن تغییر می‌کند اگر $\omega = \omega_p$ و پلازما غیرمغناطیسی و غیربرخوردی باشد مقدار ϵ و ضریب شکست صفر می‌گردد. حال اگر به پلازما سرد یک میدان مغناطیسی خارجی اعمال کنیم و فرکانس برخورد را نیز در نظر گرفته شود باعث ایجاد ناهمسانگردی در پلازما می‌گردد. که رابطه پاشندگی آن از معادله‌ی (۱) به‌دست می‌آید [3].

(۱)

$$\tilde{\epsilon} = 1 - \frac{\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{\left(1 - i \frac{\nu}{\omega} - \frac{\frac{\omega_b^2}{\omega^2} \sin^2 \theta}{2 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - i \frac{\nu}{\omega} \right)} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_b}{\omega} \sin \theta \right)^4 + \frac{\omega_b^2}{\omega^2} \cos^4 \theta}}$$

در این معادله $\omega_p = \left(\frac{4\pi ne^2}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ فرکانس پلاسما و ν فرکانس برخورد n چگالی ذرات پلاسما به ترتیب بار و جرم الکترون و $\omega_b = \frac{eB}{m}$ فرکانس مغناطیسی پلاسما است که در اثر اعمال میدان مغناطیسی ایجاد می‌گردد. زاویه تابش موج و ω فرکانس موج ورودی به پلاسما است. با توجه به این که ضرایب α و k در جذب و انعکاس اهمیت زیادی دارد لذا این پارامترها محاسبه شده است. اگر در معادله (۱) $B=0$ باشد. با استفاده از روابط ۲ الی ۴ داریم:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\mu_0\vec{H} \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = (\sigma + i\omega\tilde{\epsilon}_r\epsilon_0)\vec{E} \quad (2)$$

$$\hat{k} = k + i\alpha = \frac{\omega\sqrt{\hat{\epsilon}_r}}{c} \quad (3)$$

$$\tilde{k}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \hat{\epsilon}_r \quad (4)$$

اگر در حالت اول میدان مغناطیسی خارجی موازی بر راستای انتشار باشد ($\theta=0$) مقدار گذردهی الکتریکی $\tilde{\epsilon}_r$ و ضرایب ω و α (ω) از معادله (۳) و (۴) به صورت معادلات زیر محاسبه می‌گردد.

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{-\frac{1}{2}\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega}\right)^2}} \quad (5)$$

$$k(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \frac{\nu}{\omega}\right)^2}} \quad (6)$$

در حالت بعدی میدان مغناطیسی خارجی عمود بر راستای انتشار باشد ($\theta=90$) مقدار گذردهی الکتریکی $\tilde{\epsilon}_r$ و ضرایب ω و α (ω) از معادله (۱) به صورت معادلات زیر محاسبه می‌گردد. که ضریب موهومی ω و α و ضریب حقیقی $k(\omega)$ در رابطه (۷) نمایش داده شده است.

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\omega_p^2(\omega^2 - \omega_p^2)(\omega^2 - \omega_p^2 - \omega_b^2) + \omega^2\nu^2}{\omega^2(\omega^2 - \omega_p^2 - \omega_b^2 - \nu^2)^2 + \nu^2(2\omega^2 - \omega_p^2)^2} - i \left(\frac{\nu\omega_p^2(\omega^4 + \omega^2(\omega^2 - 2\omega_p^2 + \omega_b^2 + \nu^2))}{\omega(\omega^2(\omega^2 - \omega_p^2 - \omega_b^2 - \nu^2)^2 + \nu^2(2\omega^2 - \omega_p^2)^2)} \right) \quad (7)$$

۳- محاسبه ضرایب انعکاس و عبور امواج در انعکاس‌های متوالی هنگام برخورد با یک تیغه پلاسمایی

در انعکاس‌های متوالی موج درون پلاسما می‌توان ضرایب جذب A ، عبور T و بازتاب R را در یک تیغه پلاسمایی ضخیم محاسبه نمود. ضریب انعکاس از رابطه (۸) محاسبه شده است.

$$R = \frac{R_{12}[1 - e^{-2\alpha d_s}(2R_{12} - 1)]}{1 - R_{12}^2 e^{-2\alpha d_s}} \quad (8)$$

همچنین ضریب عبور نیز به همین صورت به دست می‌آید.

$$T = \frac{R_{12}[(1 - R_{12})^2 e^{-\alpha d_s}]}{1 - R_{12}^2 e^{-2\alpha d_s}} \quad (9)$$

توان انعکاسی به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$p_r = p_i |R| \quad (10)$$

همچنین توان تلفاتی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Absorption = 10 \log \frac{p_a}{p_i} \quad (11)$$

و توان عبوری p_t و جذب شده p_a به ترتیب با روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند.

$$p_t = (p_i - p_r) e^{-2\alpha d} \quad (12)$$

$$p_a = (p_i - p_r - p_t) \quad (13)$$

۴- محاسبه ضرایب انعکاس و عبور امواج الکترومغناطیسی در پلاسمایی n لایه به ضخامت‌های مختلف و انعکاس‌های متوالی

با توجه به این که چند لایه بودن تیغه‌ها نقش مهمی در انعکاس و عبور موج دارد لذا در این قسمت سه لایه به ضخامت‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در هر لایه میدان مغناطیسی متغیر با زوایای مختلف وارد شده است. همچنین انعکاس‌های متوالی موج لحاظ شده است. و زاویه تابش موج ابتدا بصورت عمود و مایل در نظر گرفته شده تا بتوان از تمامی پارامترهای موجود بهترین نتایج را بدست آورد. محاسبه $\tilde{\epsilon}_r$ برای حالتی که میدان مغناطیسی عمود بر تیغه‌های پلاسمایی در معادله (۱) $\theta = 90$ لحاظ شده و بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{\frac{\omega_p^2}{\omega^2}}{1 - i \frac{\nu}{\omega} - \frac{\omega_b}{\omega}} \quad (14)$$

ضریب انعکاس در لایه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\Gamma(i+1) = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} \cos \varphi - \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1) - \tilde{\epsilon}_r(i) \sin^2 \varphi}}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} \cos \varphi + \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1) - \tilde{\epsilon}_r(i) \sin^2 \varphi}} \quad (15)$$

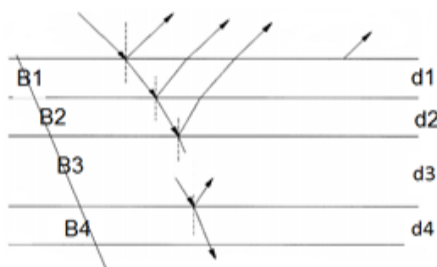
اگر زاویه تابش موج الکترومغناطیسی با پلازما صفر باشد یعنی $\varphi = 0$

$$\Gamma(i+1) = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} - \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1)}}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} + \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1)}} \quad (16)$$

$$P_r = P_i \left\{ |\Gamma(1)|^2 + \sum_{j=2}^4 |\Gamma(j)|^2 \times \prod_{i=1}^{j-1} (\exp[-4\alpha(i)d(1-|\Gamma(i)|^2)]) \right\} \quad (17)$$

$$P_t = P_i \prod_{i=1}^4 (\exp[-2\alpha(i)d(1-|\Gamma(i)|^2)]) \quad (18)$$

شکل شماره ۱ نمایشگر n لایه پلاسمایی که در کنار هم قرار گرفته‌اند. d_i ضخامت لایه i ام است. B_i میدان مغناطیسی وارد شده به هر لایه است. زاویه تابش موج به این چند لایه پلاسمایی φ است.



شکل (۱): تیغه‌های پلاسمایی n لایه متوالی که میدان مغناطیس B تحت زاویه تابش θ و فرکانس برخورد ν و زاویه

تابش φ و ضخامت‌های d_1, d_2, d_3, d_4 و چگالی‌های برخورد n_1, n_2, n_3

۵- شکل‌ها، جدول‌ها و روابط

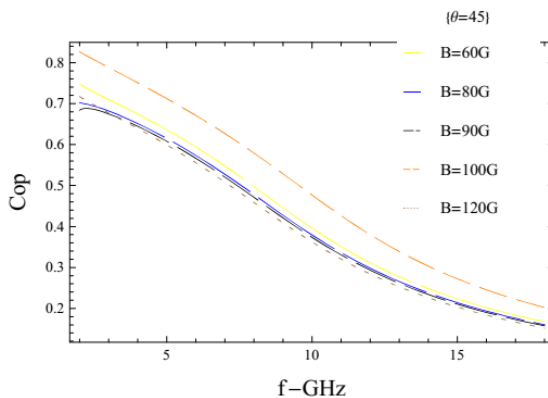
۵-۱ رسم نمودارها

با استفاده از ۱۲ و ۱۳ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی برای حالت پلاسمای یک لایه و چند لایه در حالت انعکاس کلی محاسبه شده است. همچنین ضریب انعکاس برای تیغه‌های متوالی از معادله ۱۵ محاسبه شده است. با شبیه‌سازی معادلات ۱۲ و ۱۳ و ۱۵ در نرم‌افزار متمتیکا برای دو حالت که در حالت الف پلازما بصورت تک لایه، سه لایه در نظر گرفته شده است و با در نظر گرفتن تمامی

پارامترهای موثر از جمله فرکانس برخورد ν ، فرکانس پلاسما ω_p ، فرکانس تولید شده به وسیله میدان مغناطیسی ω_b به همراه زاویه‌ای که به پلاسما وارد می‌شود، زاویه تابش امواج الکترومغناطیسی در باند KU و ضخامت لایه‌ها، چگالی الکترونی پلاسما n نمودار COP^1 رسم شده است.

الف: تیغه پلاسمایی تک لایه

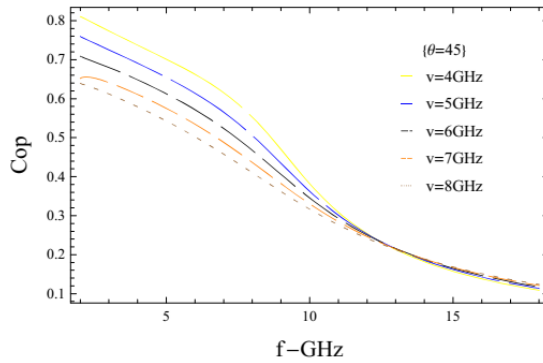
در شکل شماره (۲) ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر تک لایه پلاسمایی ۴۵ می‌باشد. این نمودار تحت ۵ حالت میدان مغناطیسی بررسی شده است با توجه به نمودار با افزایش فرکانس میزان جذب کاهش یافته است.



شکل (۲) - ضریب پلاسمایی محافظت (COP) از دستگاه‌ها با استفاده از تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی موج و برای میدان‌های مغناطیسی متفاوت در تیغه یک لایه پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

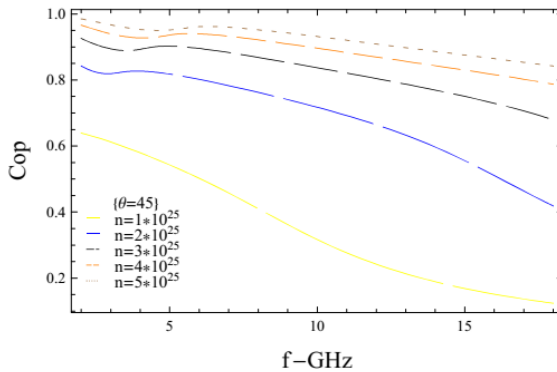
$$B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d=5cm, n = 10^{25}$$

در شکل شماره (۳) ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر تک لایه پلاسمایی ۴۵ می‌باشد. این نمودار تحت ۵ حالت فرکانس برخورد مختلف بررسی شده است با توجه به نمودار با افزایش فرکانس میزان جذب کاهش یافته است.



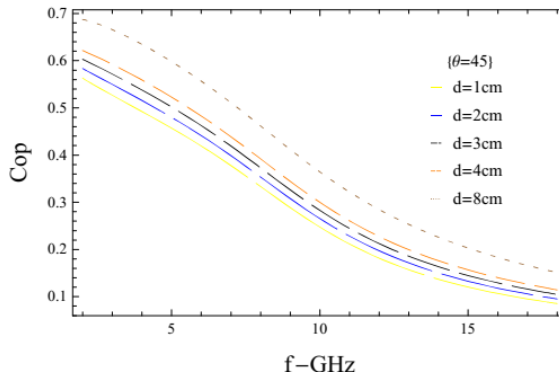
شکل (۳) ضریب پلاسمایی محافظت (cop) از دستگاه‌ها با استفاده از تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی موج با فرکانس برخورد متفاوت در تیغه پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد. $B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d=5cm, n = 10^{25}$

در شکل شماره ۴ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ GHz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر تک لایه پلاسمایی ۴۵ می‌باشد. این نمودار تحت ۵ حالت چگالی ذرات پلازما در مختلف بررسی شده است با توجه به نمودار با افزایش فرکانس میزان جذب کاهش یافته است.



شکل (۴) - ضریب پلاسمایی محافظت (cop) از دستگاه‌ها با استفاده از تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی موج و فرکانس پلاسمایی $B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d=5cm$ با توجه به چگالی الکترونی متفاوت در تیغه تک لایه پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

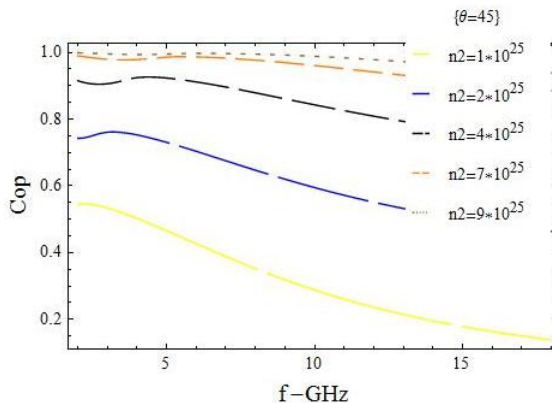
در شکل شماره ۵ ضریب جذب امواج الکترومغناطیس در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر تک لایه پلاسمایی ۴۵ می باشد. این نمودار تحت ۵ حالت ضخامت های مختلف بررسی شده است با توجه به نمودار با افزایش فرکانس میزان جذب کاهش یافته است.



شکل (۵) - ضریب پلاسمایی محافظت (cop) از دستگاه ها با استفاده از تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس های متوالی موج برای ضخامت های متفاوت تیغه، $B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d = 5cm, n = 10^{25}$ موج راستگرد می باشد.

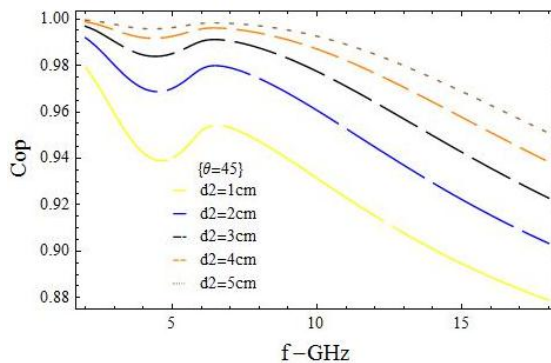
ب: تیغه های پلاسمایی چند لایه

در این حالت فرض می کنیم پلاسمای چند لایه باشد. ضریب پلاسمایی محافظت (cop) در شکل شماره ۶ ضریب جذب امواج الکترومغناطیس در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر چند لایه پلاسمایی ۴۵ می باشد. این نمودار تحت ۵ حالت چگالی ذرات مختلف بررسی شده است با توجه به این نمودار در مقایسه حالت تک لایه مقدار جذب به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. با افزایش فرکانس میزان جذب کاهش یافته است.



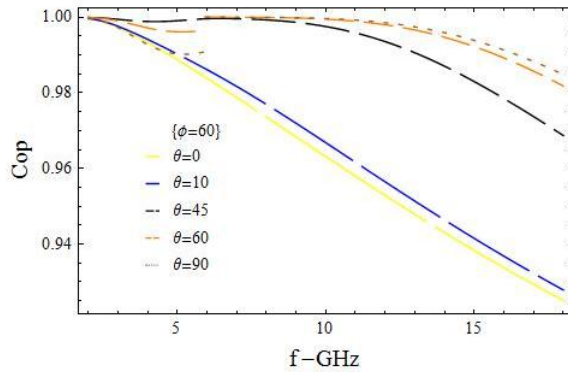
شکل (۶) - ضریب پلاسمایی محافظت (cop) از با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی و چگالی‌های مختلف در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد. $B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d_1 = 5cm, d_2 = 5cm, d_3 = 5cm$

در شکل شماره ۷ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است زاویه تابش میدان مغناطیسی بر چند لایه پلاسمایی ۴۵ می‌باشد. ضخامت هریک از لایه ها مساوی در نظر گرفته شده است این نمودار تحت ۵ ضخامت مختلف بررسی شده است با توجه به مقایسه این نمودار با نمودار ۵ با افزایش فرکانس میزان جذب ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد در فرکانس ۵ Ghz بحث تشدید فرکانس رخ می‌دهد.



شکل (۷) - میزان محافظت دستگاه‌ها با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی و ضخامت‌های مختلف $B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, n_1 = 10^{25}, n_2 = 10^{26}, n_3 = 9 \times 10^{24}$ در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

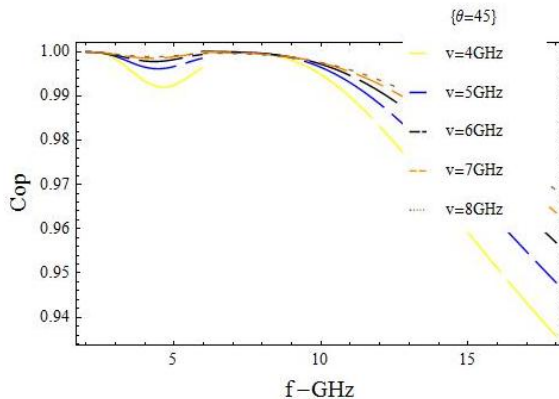
در شکل شماره ۸ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است. ضخامت هریک از لایه ها مساوی در نظر گرفته شده است این نمودار تحت ۵ زاویه تابش مختلف میدان مغناطیسی بررسی شده است با توجه به این نمودار افزایش زاویه میدان مغناطیسی سبب کاهش و با افزایش فرکانس میزان جذب ابتدا کاهش می‌یابد.



شکل (۸) - میزان محافظت دستگاه‌ها با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی موج و زاویه متفاوت اعمال میدان مغناطیسی در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

$$B = 80G, \nu = 8GHz, \varphi = 60, d_1 = 5cm, d_2 = 7cm, d_3 = 5cm, n_1 = 10^{25}, n_2 = 10^{26}, n_3 = 10^{24}$$

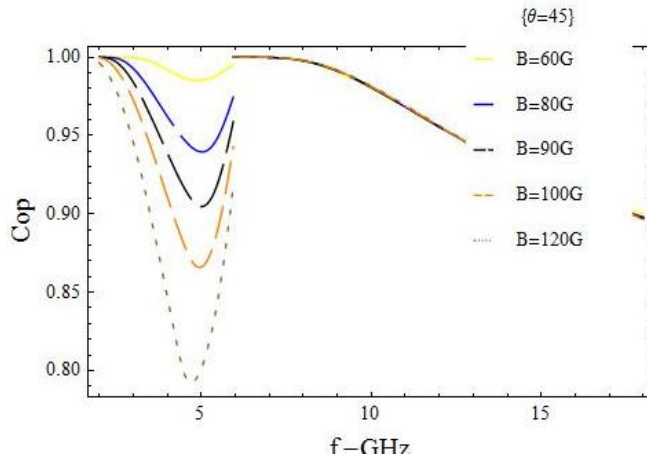
در شکل شماره ۹ ضریب جذب امواج الکترومغناطیس در فرکانس ۲-۱۸ GHz رسم شده است. این نمودار تحت ۵ فرکانس برخورد مختلف بررسی شده است با توجه به مقایسه این نمودار با نمودار ۵ افزایش تعداد لایه‌ها سبب ایجاد پیک در نمودار جذب می‌شود.



شکل (۹) - میزان محافظت دستگاه‌ها با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی و فرکانس‌های برخورد مختلف در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

$$B = 80G, \theta = 45, \varphi = 60, d_1 = 5cm, d_2 = 7cm, d_3 = 5cm, n_1 = 10^{25}, n_2 = 10^{25}, n_3 = 10^{24}$$

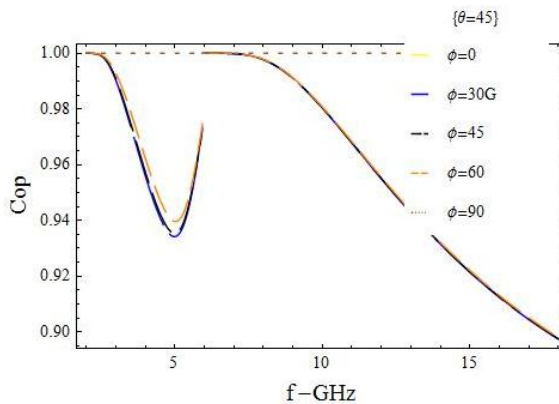
در شکل شماره ۱۰ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است. این نمودار تحت ۵ میدان مغناطیسی مختلف بررسی شده است. ایجاد لایه‌های بیشتر سبب جذب بهتر و ایجاد تشدید و رزونانس می‌گردد افزایش میدان مغناطیسی تاثر زیادی بر جذب دارد.



شکل (۱۰)- میزان محافظت دستگاه‌ها با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی و برای میدان‌های مغناطیسی مختلف در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

$$\nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 60, d_1 = 5cm, d_2 = 5cm, d_3 = 5cm, n_1 = 10^{25}, n_2 = 10^{25}, n_3 = 10^{24}$$

در شکل شماره ۱۱ ضریب جذب امواج الکترومغناطیسی در فرکانس ۲-۱۸ Ghz رسم شده است. این نمودار تحت ۵ زاویه تابش موج الکترومغناطیسی مختلف بررسی شده است. ایجاد لایه‌های بیشتر سبب جذب بهتر و ایجاد تشدید و رزونانس می‌گردد افزایش زاویه تابش باعث کاهش جذب می‌گردد.



شکل (۱۱) - میزان محافظت دستگاه‌ها با استفاده از سه تیغه پلاسمایی، با توجه به انعکاس‌های متوالی و برای زوایای تابش مختلف در تیغه‌های پلاسمایی، موج راستگرد می‌باشد.

$$B = 80G, \nu = 8GHz, \theta = 45, \varphi = 0 \text{ to } 60, d_1 = 5\text{cm}, d_2 = 5\text{cm}, d_3 = 5\text{cm}, n_1 = 10^{25}, n_2 = 10^{25}, n_3 = 10^{24}$$

۵- جدول‌ها

در این قسمت جهت مقایسه ضرایب محافظت بین تیغه پلاسمایی تک لایه و سه لایه نتایج را بصورت پارامتری در دو جدول الف و ب آورده شده است.

جدول ۱- نمایش پارامترهای *cop* بر حسب پارامترهای مختلف پلاسمای در حالت تک لایه

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
ضخامت تیغه d	۵Cm	۵Cm	۵Cm	۱ Cm
زاویه تابش موج φ	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰
میدان مغناطیسی θ	۶۰الی۱۲۰	۸۰	۸۰	۸۰
ویه میدان مغناطیسی B	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵
فرکانس برخورد GHz	8 GHz	۴ الی ۸	۸ GHz	۸ Hz
چگالی برخورد n	10^{25}	10^{25}	10^{25}	10^{25}
میانگین COP	۰.۴	۰.۵	۰.۷	۰.۶

جدول ۲- نمایش پارامترهای *cop* بر حسب پارامترهای مختلف پلاسمای در حالت سه لایه

پارامتر	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
ضخامت تیغه d1	۵Cm	۵Cm	۵Cm	۵Cm
ضخامت تیغه d2	۷Cm	۷Cm	(۸-۱) Cm	۷Cm
ضخامت تیغه d3	۵Cm	۵Cm	۵Cm	۵Cm
زاویه تابش موج φ	۶۰	۶۰	۶۰	۶۰

۸۰	۸۰	۸۰	۲۰ الی ۴۵	میدان مغناطیسی θ
۴۵	۹۰ الی ۱۰۰	۴۵	۴۵	زاویه میدان مغناطیسی B
۸ GHz	۸ GHz	۸ الی ۴	۴	فرکانس برخورد v
۱۰.۲۵	۱۰.۲۵	۱۰.۲۵	۱۰.۲۵	چگالی برخورد n1
۱۰.۲۶	۱۰.۲۶	۱۰.۲۶	۱۰.۲۶	چگالی برخورد n2
۱۰.۲۴	۱۰.۲۴	۱۰.۲۴	۱۰.۲۴	چگالی برخورد n3
۰.۹۶	۰.۹۸	۰.۹۶	۰.۸۵	میانگین COP

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

افزایش تعداد لایه‌ها تأثیر زیادی بر ضریب **cop** دارد. افزایش تعداد لایه‌ها سبب ایجاد تشدید در پارامتر جذب می‌گردد و سبب می‌شود جذب بهتر صورت پذیرد. افزایش تعداد لایه‌ها پهنای باند را افزایش می‌دهد که نقش مهمی در ضریب محافظت خواهد داشت. همچنین با افزایش فرکانس موج ورودی به این لایه‌ها روند افزایش جذب کاهشی می‌باشد. می‌توان با تغییر پارامترهای لایه دوم به‌عنوان مثال، افزایش چگالی ذرات باعث می‌شود که ضریب جذب موج در لایه‌ها کم می‌شود. بنابراین لایه دوم نقش زیادی در **cop** خواهد داشت. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ضخامت در چندلایه تأثیر زیادی بر افزایش ضریب **cop** خواهد داشت. با توجه به شکل ۶ افزایش میزان چگالی ذرات ضریب **cop** به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد. با افزایش فرکانس موج ورودی ضریب **cop** کاهش می‌یابد ولی با توجه به پارامترهای انتخاب شده، فرکانس موردنظر در باند **ku** میزان **cop** ایدئال می‌باشد. برای افزایش میزان پهنای باند از فرکانس برخورد در پلازما استفاده می‌شود. افزایش فرکانس برخورد سبب افزایش پهنای باند می‌گردد. افزایش زاویه تابش میدان مغناطیسی سبب جابجایی پهنای باند به سمت فرکانس‌های بالا پیش می‌رود. همچنین افزایش زاویه سبب کاهش ورود موج به دستگاه‌ها می‌گردد. افزایش ضریب شکست محیط باعث جابجایی پهنای باند به سمت فرکانس‌های بالاتر می‌گردد. با افزایش زاویه میدان مغناطیسی مقدار **cop** زیاد شده و پهنای باند نیز افزایش می‌یابد. در بیشتر نمودارهای بالا مشاهده می‌گردد که دارای نقاط اکسترمم هستیم که علت آن نزدیکی فرکانس پلازما و فرکانس مغناطیسی پلازما با فرکانس موج ورودی می‌باشد. پیشنهاد می‌-

گردد برای رسیدن به حالت بهینه از نمودار در تیغه دوم هرچه می توان چگالی ذرات را به حدی رسان که ضریب نفوذ تقریباً صفر باشد. طراحی یک سیستم تحت شرایط نمودار ۸ که cop تقریباً برابر یک است بسیار کاربرد می باشد همچنین پیشنهاد می گردد تعداد لایه ها ۳ باشد که از نظر طراحی ساختار پلاسمایی مقرون به صرفه باشد

۷- مراجع

- [1]- Bathish, B., et al., *Absorption-induced transmission in plasma microphotronics*. Nature Communications, ۲۰۲۳. ۱۴(۱): p. ۴۵۳۵
- [2]- Seyed Ali Hosseini Moradi - Hassan Ranjbar Askari -Mojtaba Rahim The Absorption of X-band Radar Electromagnetic Waves in the Plasma Layer Blades in Consecutive Reflections-69-pp4, magiran.com /p1281389 (1393)
- [3]- V, Shukla ,Review on the Electromagnetic Interference Shielding Materials fabricated by Iron Ingredients (2019)
- [4]-X. M. Qiu, "Interaction of electromagnetic wave with plasma" (in Chinese), Nucl. Fusion Plasma Phys., vol. 18, pp. 53–55, (1998).
- [5] V. L. Ginzberg, *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma*. New York: Pergammon, (1970).
- [6] A. Ishimaru, "Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering". Prentice, Rochester, New Jersey, (1975).
- [7] D. L. Tang, A. P. Sun, X. M. Qiu, and Paul K. Chu " Interaction of electromagnetic waves with a magnetized nonuniform plasma slab" IEEE Trans. Plasma Science. 18 ... (2003) 405-410.
- [8] J. A. Bittencourt, "Fundamentals of Plasma Physics", Research Scientist ..Professor, Institute for Space Research (INPE), Sao Paulo, Brazil, (1986).
- [9] Theoretical " Principles of plasma physics and atomic". <http://www.plasmaphysics.org.uk/> E. Koretzky, S.P. Kuo, Phys. Plasmas 5 (1998) 3774.
- [10] H.M. Liu, X.W. Hu, Z.H. Jiang, X.P. Lu, C.L. Gu, Y. Pan, Chinese Phys. Lett. 18 (2001) 1225.
- [11] B.J. Hu, G. Wei, S.L. Lai, IEEE Trans. Plasma Sci. 27 (1999) 1131.
- [12] D.L. Tang, A.P. Sun, X.M. Qiu, P.K. Chu, IEEE Trans. Plasma Sci. 31 (2003) 405.

- [13] A.P. Sun, H.H. Tong, L.R. Shen, D.L. Tang, X.M. Qiu, Nucl. Fusion and Plasma Phys. 21 (2001) 224.
- [14] C. Yeh, W.V.T. Rusch, J. Appl. Phys. 36 (1965) 2302.
- [15] M. Laroussi, J.R. Roth, Int. J. Infrared and Millimeter Waves 14 (1993) 1601.
- [16] G.T. Ruch, D.E. Barrick, W.D. Stuart, C.K. Krichbaum, in: Radar Cross Section Handbook, Plenum, New York, (1970), pp. 473–492